



В.В.Порфирьев

# АСТРОНОМИЯ 10

Рецензенты:  
кандидат физико-математических наук,  
доцент ЛГУ *В. А. Гаген-Торн*,  
старший инженер Учебно-методического  
управления Госпрофобра СССР *В. Ф. Шустов*

**Владимир Владимирович Порфирьев**

## АСТРОНОМИЯ

Пробный учебник для 10 класса средней школы

Зав. редакцией *И. А. Иванов*  
Редактор *Л. С. Мордовцева*  
Младший редактор *О. В. Агапова*  
Художники *А. М. Коламацкий, В. С. Давыдов*  
Художественный редактор *В. М. Прокофьев*  
Технический редактор *С. С. Якушкина*  
Корректоры *Л. А. Ежова, Н. В. Красильникови*

ИБ № 10080

Сдано в набор 06.08.86. Подписано к печати 22.12.86. А 08777. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. офс. № 1.  
Гарнит. литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 10,0 + 0,25 форз. Усл. кр.-отт. 21,5. Уч.-изд. л.  
9,14 + 0,44 форз. Тираж 31 000 экз. Заказ 1317. Цена 20 коп.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Просвещение» Государственного комитета РСФСР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 129846, Москва, 3-й проезд Марьиной роши, 41.

Смоленский полиграфкомбинат Росглаволиграфпрома Государственного комитета РСФСР по делам  
издательств, полиграфии и книжной торговли. 214020, Смоленск, ул. Смольянинова, 1.

**Порфирьев В. В.**

П60 Астрономия: Проб. учеб. для 10 кл. сред. шк.—М.:  
Просвещение, 1987.—160 с.: ил.

П 4306021200—275  
103(03)—87 инф. письмо —87

ББК 22.6я72

## ОБ УЧЕБНИКЕ

В X классе вам предстоит изучить новый предмет — астрономию. Он занимает в системе школьных курсов совершенно особое место. Астрономия обобщает, систематизирует и дополняет знания, полученные вами при изучении всех школьных предметов, и самое важное — она закладывает основы материалистического мировоззрения. И хотя не каждый из вас станет астрономом, изучение этого курса совершенно необходимо.

На уроках астрономии вы узнаете, как устроен окружающий нас мир и как он развивается, как движутся небесные тела (в том числе и искусственные спутники Земли и космические аппараты), почему светят звезды, как они возникли и многое другое. Полученные знания помогут вам научиться правильно объяснять многие астрономические явления. В процессе изучения астрономии вы поймете, что законы, рассматриваемые на уроках физики, химии и других предметов, помогают нам понять процессы, происходящие в небесных телах. В то же время астрономия познакомит вас с такими явлениями и процессами, которые протекают в условиях, пока еще недостижимых в земных лабораториях, т. е. вы убедитесь, что она ставит перед другими науками все новые задачи, решать которые предстоит и вам.

В соответствии с задачами курса построен и учебник. Уже сами названия глав нетрадиционны. Но они выбраны такими, чтобы сразу подчеркнуть содержание очередной главы.

В учебнике мало определений и формулировок, которые нужно заучивать. Но их следует внимательно изучать, так как почти все рассматриваемые законы используются в дальнейшем. Поэтому работа с учебником потребует от вас трудолюбия и самостоятельности. Нужно каждый раз хорошо разобраться в том, что именно происходит и как это явление объясняется с точки зрения физических законов.

По мере изучения отдельных разделов вы будете переходить ко все более далеким и более сложным объектам. Наконец,

последняя глава посвящена космологии – науке о Вселенной. В ней вы познакомитесь с современными представлениями о строении и эволюции Вселенной. Это очень сложная проблема, которая решается на основании всех наших знаний о природе.

Каждая глава заключается вопросами и задачами. Их немного, и нужно ответить на все вопросы и решить все задачи. Это поможет вам глубже понять и усвоить материал учебника.

Астрономические данные получают в основном путем наблюдений. Проводить эксперименты, т. е. направленно воздействовать на изучаемые объекты, астроном не может. Поэтому самостоятельные наблюдения при изучении астрономии чрезвычайно полезны. В связи с этим вам следует приобрести навыки выполнять простейшие наблюдения. Для выработки программы наблюдений используйте «Школьный астрономический календарь» на текущий учебный год и приложенную к нему подвижную карту звездного неба. Если у вас есть школьный или любительский телескоп, то ваши наблюдения станут еще более интересными.

В заключение выразим надежду, что знакомство с астрономией будет не только полезным, но и приятным. Желаем успехов!

# Глава I

## ВВЕДЕНИЕ

### § 1. НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД РАЗВИТИЯ АСТРОНОМИИ

**1. Предмет астрономии.** *Астрономия — наука о строении и развитии небесных тел, образуемых ими систем и Вселенной в целом.* Название ее происходит от двух греческих слов: *астрон* — звезда и *номос* — закон.

Эта наука возникла в древности из практических потребностей человека: необходимости счета времени, предсказания сезонных явлений, определения положения наблюдателя на поверхности Земли, нахождения правильного курса корабля в море или каравана в пустыне. Уже в самых древних письменных источниках мы находим хорошо развитую систему астрономических знаний.

Астрономия — наука, основанная на наблюдениях. Простейшие из них — это наблюдения за звездным небом невооруженным глазом. В темную безлунную ночь небо представляется нам полусферой, усеянной звездами, в центре которой находится наблюдатель. Вторая половина сферы закрыта Землей. Мы замечаем, что на востоке из-под горизонта поднимаются невидимые ранее светила, а на западе они опускаются за горизонт. Образ сферы возникает потому, что мы можем непосредственно оценить расстояния только меньшие 3—4 км. Все предметы, расположенные дальше, кажутся нам одинаково удаленными.

При первом знакомстве со звездным небом кажется, что число звезд бесконечно велико. В действительности же невооруженному глазу доступно для наблюдения на всем небе около 6000 звезд, а одновременно можно видеть только около 2000, так как половина неба закрыта Землей; кроме того, у горизонта всегда существует дымка, скрывающая многочисленные слабые звезды.

**2. Созвездия. Наименования звезд.** Для проведения систематических наблюдений звездного неба нужно запомнить относительное расположение большого числа звезд. Для облегчения этой задачи уже в древности наиболее яркие и заметные звезды



Рис. 1. Изображение созвездия Ориона на средневековой карте неба.

были объединены в группы — созвездия. Самые первые созвездия получили названия по именам животных (*Рак, Лев, Овен* и т. д.), более поздние — по именам героев известных мифов (*Персей, Андромеда, Геркулес* и др.) или по именам тех предметов, которые напоминали их фигуры (*Лира, Стрела, Северная Корона* и др.); на южном небе созвездия выделялись уже в период Великих географических открытий, что отразилось на их названиях (*Микроскоп, Компас*). На звездных картах созвездия изображались красивыми рисунками (рис. 1).

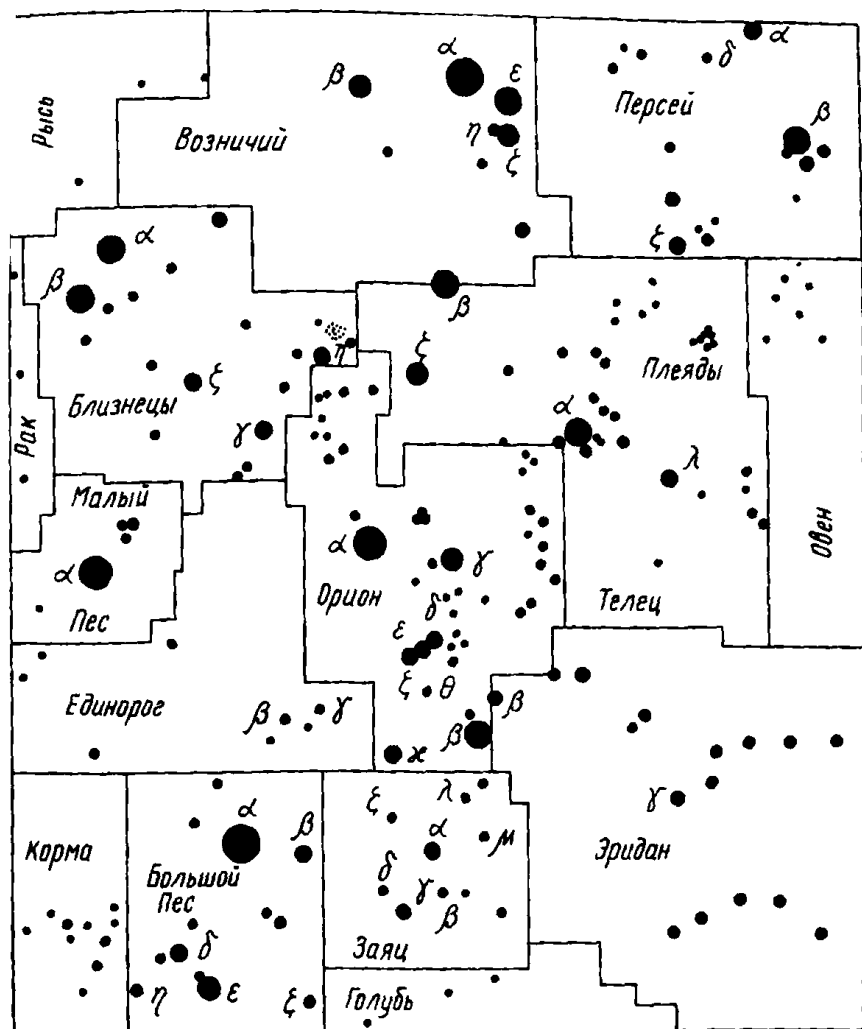


Рис. 2. Созвездие Ориона на современной звездной карте.

В созвездия объединялись не все звезды. Поэтому некоторые астрономы выделяли на небе все новые и новые созвездия. Чтобы ликвидировать создавшуюся путаницу, Международный астрономический союз в 1922 г. постановил оставить только 88 созвездий с их традиционными названиями и принял решение называть *созвездием* всю область неба, находящуюся в пределах установленных границ. Все звезды, видимые в данной области как невооруженным глазом, так и в телескоп, считаются принадлежащими этому созвездию (рис. 2).

Тогда же были сформулированы и правила наименования звезд. В порядке убывания видимой яркости звезды созвездия обозначаются сначала греческими ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , ...), затем латинскими буквами, потом цифрами с прибавлением названия созвездия, например:  $\alpha$  Большого Пса,  $\beta$  Лиры,  $\gamma$  Зайца, 61 Лебеда. Звезды, невидимые невооруженным глазом, как правило, обозначаются номером в каком-либо каталоге (списке звезд).

Внимательно наблюдая за небом, люди убедились, что взаимное расположение звезд не изменяется. Только несколько светил, внешне отличающиеся лишь ровным сиянием (звезды все время мерцают), меняли свое положение относительно звезд. Эти светила называли планетами (лат. *planeta* — блуждающая). В древности к планетам причисляли Луну и Солнце. Уже тогда было выяснено, что Луна и Солнце перемещаются среди звезд только с запада на восток (такое движение называется прямым), планеты же могут совершать прямое движение, останавливаться (стояние) и перемещаться в обратную сторону (обратное движение с востока на запад) (рис. 3).

**3. Системы мира. Геоцентрическая система Птолемея.** Одной из основных задач астрономии всегда было создание систе-

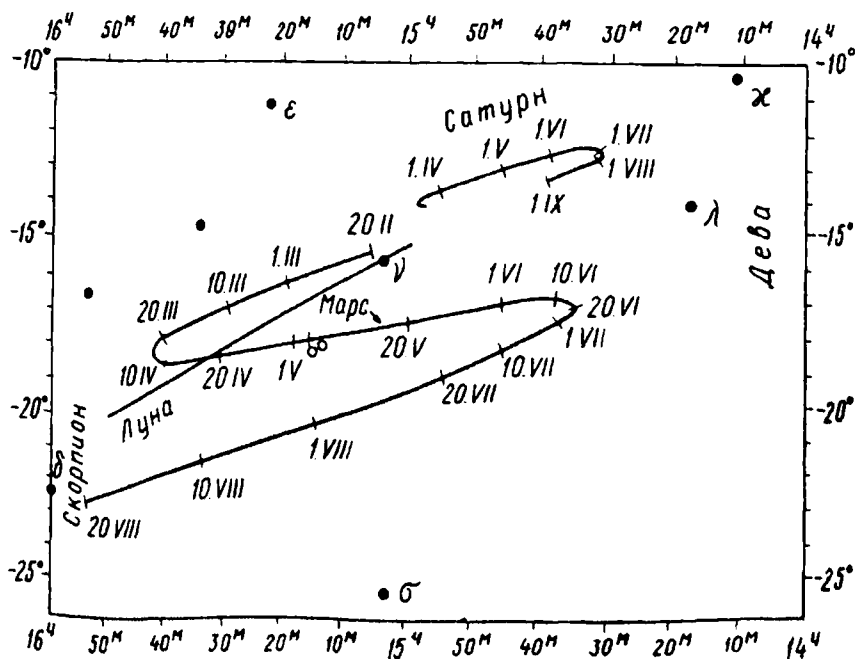


Рис. 3 Пути среди звезд: Луны за 1 день, Марса за 6 и Сатурна за 3 месяцев

мы мира, или, говоря современным языком, такой модели, которая, соответствуя существующим представлениям об окружающем мире и об основных законах природы, позволяла бы описывать наблюдаемые явления и предсказывать важнейшие из них, т.е. позволяла бы судить о действительном устройстве мира.

Первая научная система мира начала формироваться в трудах Аристотеля, Гиппарха и других ученых Древней Греции. Свое завершение она получила в работах выдающегося древнегреческого астронома Птолемея, жившего во II в. н.э. Эта система называется геоцентрической системой Птолемея (рис. 4) или птолемеевой системой мира.

Согласно этой системе, в центре мира расположена Земля (по-греч. — Гея, откуда и название «геоцентрическая»). Вселенная ограничена хрустальной сферой, на которой расположены звезды (небо неподвижных звезд). Между Землей и сферой движутся планеты, в число которых включали Луну и Солнце.

В древности (да и в средние века) господствовало представление о том, что круговое равномерное движение является наиболее совершенным и что все небесные тела обладают именно таким движением. Но наблюдения показывали, что и Луна, и Солнце перемещаются по небу неравномерно, поэтому пришлось предположить, что они движутся равномерно по таким окружностям, центры которых не совпадают ни между собой, ни с центром Земли (а следовательно, и с центром мира). Еще более сложное видимое перемещение планет по небу (см. рис. 3) пришлось представить как сумму нескольких равномерных круговых движений. Согласно взглядам Птолемея, каждая планета равномерно движется по такой окружности, центр которой, в

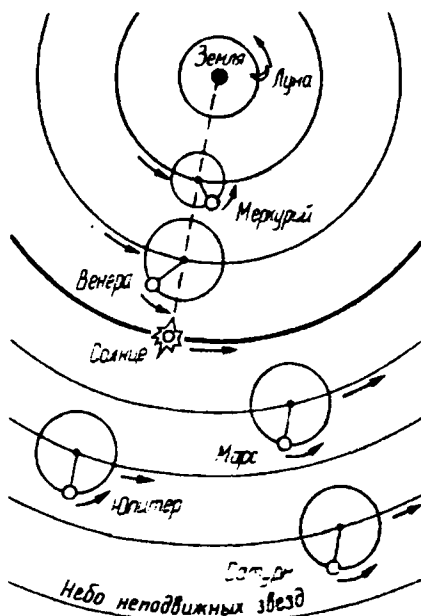


Рис. 4 Система мира Птолемея.

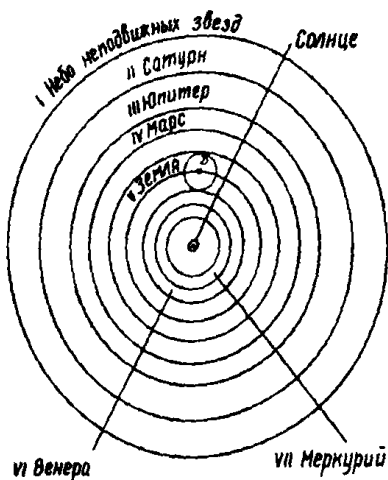


Рис. 5. Гелиоцентрическая система мира (по Н. Копернику).

свою очередь, скользит по большой, а уже центр этой окружности совпадает с центром Земли. Только сложная комбинация равномерных движений по окружностям могла объяснить неравномерное движение планет и позволяла с достаточной для наблюдений невооруженным глазом точностью рассчитывать взаимное расположение планет на будущее.

**4. Коперниканский переворот в науке.** На протяжении многих столетий ученые средневековья вели тщательные наблюдения за небом, непрерывно

совершенствуя и уточняя систему Птолемея. По необходимости вводились новые круги, смещались центры планетных орбит. Система мира все более и более усложнялась. Становилось ясным, что она ложна в своей основе.

В 1543 г. вышла в свет книга гениального польского ученого Николая Коперника «Об обращении небесных сфер». В ней была изложена новая, гелиоцентрическая система мира. Согласно этой системе, в центре мира находится Солнце (по-греч. — Гелиос, откуда и название «гелиоцентрическая»). Планеты, в том числе и Земля, обращаются вокруг Солнца по круговым орбитам, а Луна — вокруг Земли и одновременно с ней — вокруг Солнца (рис. 5).

Гелиоцентрическая система позволила освободиться от ряда произвольных и противоречивых допущений, которых требовала система Птолемея, и объяснить наблюдаемые факты с единой точки зрения. Труд Н. Коперника и сформулированный им метод исследования на многие годы определили путь развития науки.

Но не только в этом состоит величайшее значение учения Коперника. Оно произвело настоящую революцию в человеческом мировоззрении. Это учение впервые отвергло лежащее в основе любой религии представление о принципиальном отличии «земного» — низкого и порочного — от «небесного» — чистого и возвышенного. Планета Земля была сведена в число рядовых планет,

вместе с которыми она вращалась вокруг Солнца. Стала ясна несостоятельность религиозных взглядов на мир. Произошел разрыв науки с теологией, открылся путь для материалистического познания природы. Важнейший шаг в направлении развития материалистического мировоззрения был сделан Джордано Бруно, сформулировавшим идею о бесконечности Вселенной и множественности обитаемых миров.

Церковь ответила запрещением книги Н. Коперника и яростным преследованием его сторонников. Так, Джордано Бруно был осужден инквизицией и в 1600 г. сожжен на костре. Но остановить движение науки уже было невозможно.

**5. Кеплер и его законы движения планет.** Окончательная победа коперниканства связана с именами И. Кеплера и Г. Галилея. Выдающийся немецкий астроном и математик Иоганн Кеплер получил в наследство от датского астронома Тихо Браге результаты многолетних наблюдений за движением планеты Марс. Обработав их, И. Кеплер смог сформулировать три основных закона движения планет, которые носят теперь его имя. Важнейший вывод, сформулированный Кеплером, состоит в том, что планеты движутся не по кругу, а по эллипсам и неравномерно. Отказ от идеи равномерного кругового движения планет намного улучшил точность определения их положения на орбите.

**6. Галилей. Первые телескопические наблюдения.** 7 января 1610 г. считается днем начала научной астрономии. В этот день знаменитый итальянский ученый Галилео Галилей впервые направил свой телескоп (рис. 6) на небо.

Небесные светила мы изучаем, собирая, принимая, регистрируя и исследуя падающее от

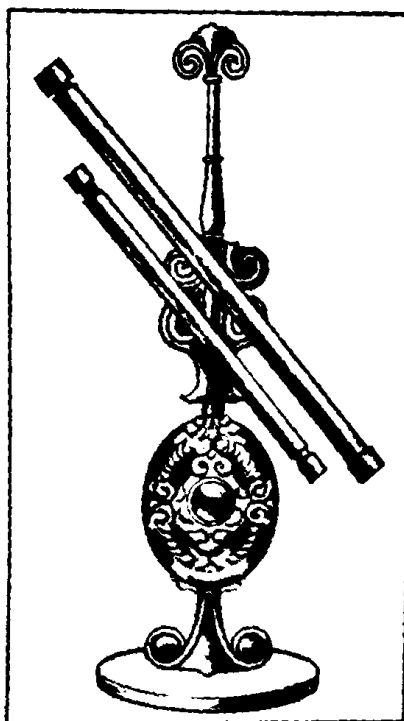


Рис. 6. Телескоп Г. Галилея.

них излучение. До появления телескопов единственным «прибором» для изучения неба был человеческий глаз. Свет, падающий на зрачок глаза, собирается на сетчатке, которая служит приемником излучения, а мозг регистрирует и изучает полученную информацию.

Телескоп тоже собирает излучение, посылаемое светилом. Но диаметр объектива телескопа значительно больше, чем зрачка глаза (0,5 см). Поэтому и света он принимает больше, следовательно, с его помощью можно получить и большую информацию об исследуемом объекте. Объектив телескопа направляет весь собранный свет на приемник излучения, которым может быть глаз человека, фотопластинка или электронный прибор. Там собранный свет регистрируется, и полученная информация изучается.

Так как телескоп собирает больше света, то ему доступны гораздо более слабые объекты, чем невооруженному глазу. Кроме того, он имеет еще одно важное преимущество, связанное с особенностями распространения света. Дело в том, что даже идеальный объектив может построить изображение светящейся точки в виде небольшого кружка. В результате, если мы рассматриваем две точки, направления на которые образуют угол меньше некоторого предельного, то изображения этих точек сольются, и мы не сможем увидеть их раздельно. Предельный угол  $\alpha$  для идеального объектива и видимого света может быть оценен по формуле:

$$\alpha = \frac{14''}{D},$$

где  $D$  — диаметр телескопа, выраженный в сантиметрах, а  $\alpha$  — предельный угол в секундах дуги. Для человеческого глаза предельный угол, вычисленный по этой формуле, равен  $28''$  (фактически не менее  $1-1,5'$ ), а для телескопа диаметром 6 м —  $0,02''$ .

Таким образом, телескоп дает исследователю совершенно новые возможности по сравнению с наблюдениями невооруженным глазом. И Г. Галилей использовал эти возможности в полной мере. Его открытия буквально перевернули представления ученых об окружающем мире.

В первые же дни наблюдений Г. Галилей обнаружил, что на небе есть огромное число слабых, невидимых глазом звезд. Выяснилось, что туманная полоса Млечного Пути состоит из столь

близко расположенных слабых звезд, что их изображения для глаз сливаются. Галилей установил, что, в отличие от звезд, планеты обладают видимыми в телескоп дисками, что Венера светит отраженным светом Солнца и, подобно Луне, меняет свой вид, представляясь нам то полным диском, то серпом. Наблюдая Луну, он увидел на ней горы и определил их высоту, а у Юпитера обнаружил четыре спутника, обращающиеся вокруг него.

Все это самым непосредственным образом опровергало библейские догмы и подтверждало теорию Коперника. На смену наивным религиозным представлениям об исключительности Земли и положения человека во Вселенной приходили новые, материалистические представления о единстве мира.

В 1633 г. Г. Галилей был обвинен в ереси, предан суду инквизиции, осужден и под угрозой пытки был вынужден отречься от своих взглядов. Но несмотря на яростное сопротивление духовенства, коперниканское учение прочно вошло в науку.

**7. Ньютон. Возникновение небесной механики.** Огромное значение для астрономии имели открытия гениального английского ученого Исаака Ньютона. Ему удалось показать, что законы Кеплера следуют из закона всемирного тяготения, и дать их обобщенные формулировки. Так под гелиоцентрическую систему был подведен прочный теоретический фундамент, движение планет теперь можно было рассчитывать с учетом сил взаимного притяжения. Это привело к тому, что в астрономии выделились два раздела: астрометрия и небесная механика (подобно тому как в физике в свое время выделились механика, оптика, электродинамика).

*Астрометрией называется раздел астрономии, занимающийся определением точных положений и движений светил на небесной сфере, а также смежными вопросами: определением и хранением времени, определением координат на поверхности Земли, изучением вращения Земли и другими связанными с этими задачами.*

*Небесной механикой называется раздел астрономии, изучающий движение небесных тел под действием сил всемирного тяготения.*

В XVII—XIX вв. развивались именно эти отрасли астрономии.

И. Ньютон не только открыл три закона механики и закон всемирного тяготения, которые стали фундаментом классической

физики, но и сформулировал основные положения новой картины мира. Согласно И. Ньютону, пространство бесконечно и однородно, т. е. в каждой точке свойства пространства одинаковы. Время течет равномерно и также одинаково во всех точках. Материя равномерно заполняет весь мир (в достаточно больших масштабах местные неоднородности незаметны, как не замечаем мы неоднородностей, связанных с молекулярным строением воздуха). В мире нет выделенных направлений и точек, а следовательно, нет и центра. Эта картина мира считалась общепринятой до начала XX в., когда была заменена новой, основанной на теории относительности.

## § 2. СТАНОВЛЕНИЕ СОВРЕМЕННОЙ АСТРОНОМИИ

**1. Открытие новых астрономических объектов.** Появление больших телескопов привело к ряду замечательных открытий. Уже в XVIII в. были найдены двойные и кратные звезды, т. е. системы, в которых две или больше звезд движутся под действием сил всемирного тяготения вокруг общего центра масс. Это открытие впоследствии позволило измерить массы звезд (см. § 24). Еще более удивительными оказались звездные скопления — системы, содержащие иногда сотни, а то и сотни тысяч звезд. Наконец, были обнаружены туманности — объекты, похожие на клочки светящегося тумана. В. Гершель предположил, что среди них встречаются два типа: *галактические* (теперь — *диффузные*, или *газовые*), представляющие облака «светящейся жидкости» и встречающиеся только в полюсе Млечного Пути, и *внегалактические*, встречающиеся только вне его. Последние (теперь они называются галактиками) он считал звездными системами, аналогичными нашей звездной системе — Галактике. Правильность этого предположения удалось доказать только в XX в.

В самом начале XIX в. были открыты астероиды, или малые планеты, — крошечные небесные тела, движущиеся между орбитами Марса и Юпитера.

**2. Аберрация света.** Улучшение техники определения положения звезд на небе позволило сделать два очень важных открытия — аберрации света и параллакса звезд.

Первое из них было сделано в 1728 г. английским астрономом Д. Брадлеем. Он обнаружил, что все звезды в течение года описывают на небе небольшие эллипсы, большие полуоси ко-

торых одинаковы и равны  $20.5''$ . Это явление (называемое *абберацией света*) является следствием конечности скорости света и движения Земли вокруг Солнца.

Абберация света является решающим доказательством движения Земли вокруг Солнца.

**3. Определение расстояний до звезд.** Первые определения расстояний до звезд были выполнены в 30-е годы XIX столетия.

Представим себе, что исследователь находится на некоторой звезде  $\Sigma$  и ведет наблюдения за Солнцем и Землей. Он видит, что Земля движется вокруг Солнца  $S$  (движением Солнца относительно него можно пренебречь) (рис. 7), т. е. что она последовательно занимает положения  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . Но если наблюдатель со звезды видит Землю в направлении  $\Sigma A$ , то земной наблюдатель видит звезду в направлении  $A\Sigma$  и проецирует ее на небесную сферу в точке  $A'$ . То же верно и для точек  $B$  и  $C$  и для любой другой точки земной орбиты. Другими словами, мы видим, что для земного наблюдателя звезда описывает на небе эллипс (если направление перпендикулярно плоскости орбиты — то круг) с угловым радиусом  $\pi$ , равным углу, под которым со звезды виден радиус земной орбиты.

Угол, под которым со звезды был бы виден радиус земной орбиты, называется *годовым параллаксом звезды*. Он обозначается  $\pi$  и измеряется в секундах дуги.

Параллакс, радиус земной орбиты и расстояние до звезды связаны между собой соотношением

$$d = \frac{a}{\sin \pi},$$

где  $a$  — большая полуось орбиты Земли,  $d$  — расстояние до звезды.

Поскольку параллаксы звезд малы (меньше  $1''$ ), то можно воспользоваться известным соотношением для синуса малого уг-

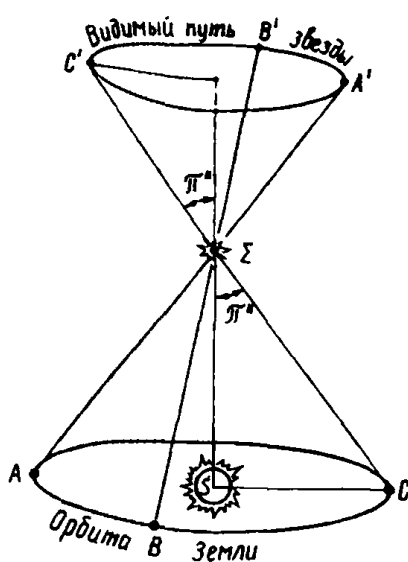


Рис. 7. К объяснению параллакса.

ла, выраженного в радианах:

$$\sin \pi \approx \pi, \text{ тогда } d = \frac{a}{\pi}.$$

Но параллаксы звезд обычно выражают в секундах дуги, а так как в 1 радиане содержится 206 265'', то расстояние будет равно

$$d = 206\,265'' \frac{a}{\pi}.$$

Из этой формулы видно, что если в качестве единицы длины оставить метр, то расстояния выражаются очень большими числами. Поэтому в астрономии используются специальные единицы длины.

**4. Единицы длины, применяемые в астрономии.** *Астрономической единицей* длины, или просто *астрономической единицей* (а. е.), называется *среднее расстояние от Земли до Солнца*, равное 149 597 870 км.

*Парсек (пк)* — расстояние, для которого *годовой параллакс* равен 1''.

*Световой год* (св. год) — расстояние, проходимое светом за 1 год.

$$1 \text{ пк} = 3,26 \text{ св. года} = 206\,265 \text{ а. е.} = 3 \cdot 10^{16} \text{ м.}$$

В 30-х годах XIX в. почти одновременно В. Я. Струве в Пулково, Т. Гендерсон на Мысе Доброй Надежды и Ф. Бессель в Кенигсберге определили параллаксы Веги,  $\alpha$  Центавра и  $\beta$  Лебедя. Оказалось, что у самой близкой к нам звезды —  $\alpha$  Центавра параллакс равен 0,76'', т. е. расстояние до нее составляет 1,3 пк, или 4,3 св. года.

Измерение расстояний до звезд позволило решить вопрос об их природе. Стало ясно, что звезды подобны Солнцу, а видны они нам как светящиеся точки только из-за огромной удаленности от Земли.

Непосредственно измерить параллакс можно только у сравнительно близких звезд, расположенных не далее 50—100 пк. Расстояния до более далеких объектов определяются косвенными методами, которые будут рассмотрены дальше.

**5. Развитие небесной механики. Открытие новых планет Солнечной системы.** Первый значительный успех небесной механики был связан с кометами.

Кометы — «хвостатые звезды», названные так за необычный вид (см. рис. 56). Они внезапно появляются на небе, быстро

проносятся среди звезд и исчезают. В 1705 г. Э. Галлей предположил, что три кометы, наблюдавшиеся в 1531, 1607, 1682 гг., в действительности являются одним и тем же небесным телом, движущимся по эллиптической орбите с периодом около 75—76 лет, и предсказал новое появление этой кометы в 1758 г. Предсказание оправдалось, и вернувшуюся «по расписанию» комету назвали именем Галлея.

Однако важнейшим достижением небесной механики было открытие новой планеты — Нептуна.

К 40-м годам XIX в. стало ясно, что движение Урана нельзя объяснить притяжением известных планет и Солнца. Была выдвинута гипотеза о существовании еще одной неизвестной планеты Солнечной системы. Труднейшую задачу расчета положения этой планеты одновременно решили английский астроном Дж. Адамс и французский математик У. Леверье.

23 сентября 1846 г. немецкий астроном И. Галле открыл неизвестную планету, получившую название Нептун, в той точке неба, которую указал ему Леверье.

Девятая планета Солнечной системы — Плутон — была открыта почти через 100 лет.

**6. Возникновение астрофизики.** Seriously ставить вопрос о природе небесных тел можно было только после создания телескопа, когда резко увеличился поток принимаемой информации. Так, изучение двойных звезд, расстояния до которых были определены, позволило уже в XIX в. найти их массы и доказать общность природы звезд и Солнца. Однако окончательное подтверждение последнему получено только после открытия спектрального анализа (Р. Бунзен, Г. Кирхгоф, 1859 г.) — метода, позволяющего по особенностям излучаемого света определить, из каких химических элементов состоит излучающий газ. Применение его к звездам показало, что на них встречаются те же химические элементы, которые известны и на Земле (рис. 8).



Рис. 8. Спектр излучения паров железа (внизу) и участок спектра звезды (вверху).

(Буквы — принятое обозначение линий в спектре Солнца. Совпадение линий в спектрах говорит о наличии атомов железа в веществе звезды.)

На основе теории спектров, созданной в 30-х годах XX в., стали определять физические условия в звездах и объяснять процессы, происходящие в них, в частности проводить количественный химический анализ вещества звезд.

Открытие спектрального анализа и законов излучения (Л. Больцман, В. Вин, М. Планк, конец XIX в.) привело к выделению новой отрасли астрономии — астрофизики.

*Астрофизикой называется раздел астрономии, в котором изучается физическая природа небесных тел и их химический состав.*

Пользуясь достижениями физики, астрофизика стремится объяснить возникновение и эволюцию небесных тел, физические процессы, происходящие в них, понять сущность наблюдаемых явлений.

Развитию астрофизики способствовало существенное улучшение техники астрономических наблюдений, связанное с изобретением фотографии.

Фотография позволяет зафиксировать изображение объекта и перенести его исследование в лабораторию. Это дает возможность проводить более тщательное изучение исследуемого предмета, а при необходимости сравнить его изображения, полученные в разное время. Наконец, фотография позволяет исследовать бо-

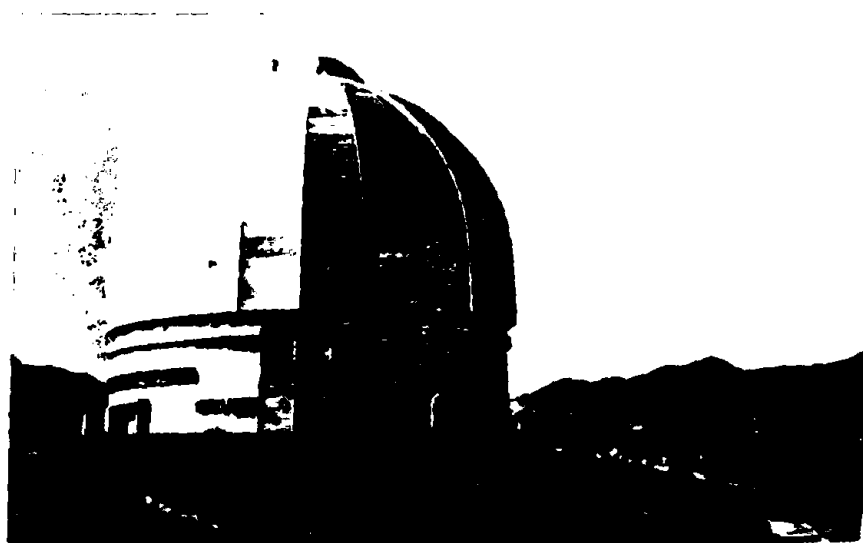


Рис. 9. Специальная астрофизическая обсерватория АН СССР. Башня шести-метрового телескопа.

лее слабые объекты, чем фиксируемые при визуальных наблюдениях с помощью телескопа, и более точно измерять их положения.

Постепенно фотографические методы полностью вытесняют визуальные наблюдения, а в наше время они, в свою очередь, сменяются еще более совершенными методами, основанными на применении электронных приборов.

**7. Астрономические обсерватории.** Уже в прошлом столетии появились астрономические обсерватории — научные учреждения, в которых сконцентрированы исследования небесных тел (рис. 9). Астрономические обсерватории строятся, как правило, вдали от крупных населенных центров, часто в горах, чтобы максимально ослабить неблагоприятное влияние постороннего освещения и погодных условий. Они оснащаются крупными телескопами. Самый большой телескоп мира находится в Специальной астрофизической обсерватории АН СССР в горах Северного Кавказа, он имеет диаметр 6 м (рис. 10). Он позволяет изучать звезды в 10 млн. раз слабее видимых невооруженным глазом. Проектируются и еще большие телескопы. Их зеркала будут составными, а диаметр объектива достигнет нескольких десятков метров.

**8. Всеволновая астрономия.** Огромную роль в развитии астрофизики играло освоение новых диапазонов электромагнитных волн. В 50-х годах было положено начало радиоастрономии (рис. 11), а в 60—70-х годах, с развитием космических полетов, удалось освоить недоступные земному наблюдателю диапазоны инфракрасного, ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучений (они поглощаются атмосферой и не доходят до поверх-



Рис. 10. Крупнейший в мире телескоп  
САО АН СССР  
(диаметр зеркала 6 м).

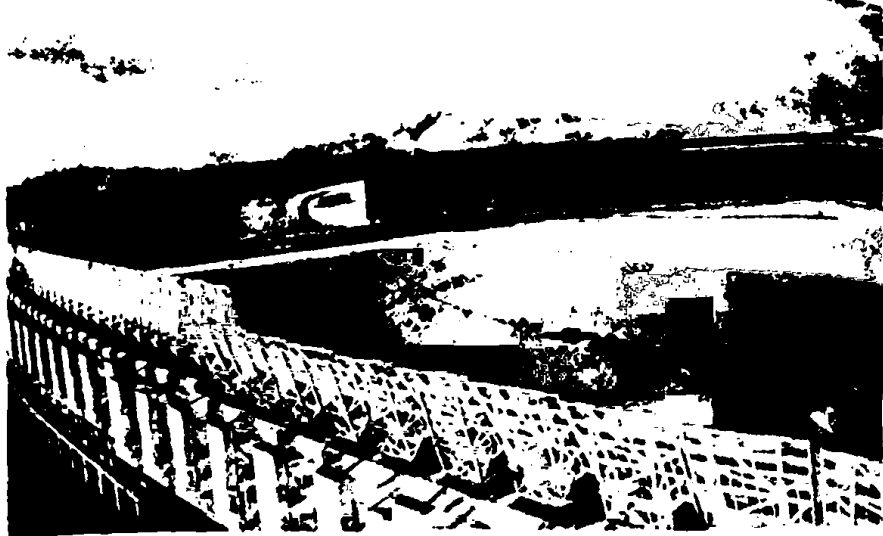
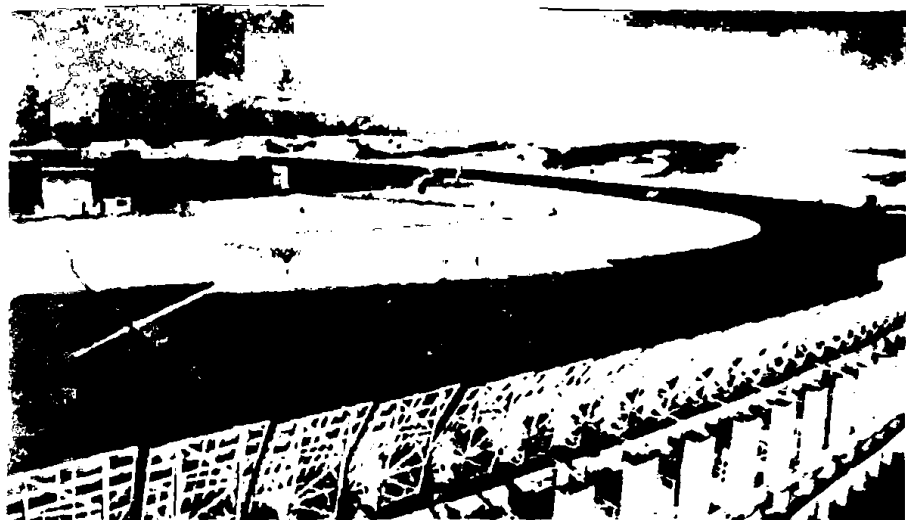


Рис. 11. Крупнейший в мире радиотелескоп АН СССР (РАТАН-600) диаметром 600 м.

ности Земли). Благодаря этому были открыты совершенно новые астрономические объекты: пульсары, квазары, рентгеновские источники и др. Расширение диапазона излучений, используемых для исследования, повышение точности наблюдений, увеличение чувствительности приборов помогают изучать более слабые и более удаленные объекты. Применение новых физических теорий к объяснению явлений, происходящих в небесных телах, позволяет глубже понять их, открыть и исследовать новые процессы.

9. Космология. В 20-х годах XX столетия Х. Шепли удалось сфотографировать в ближайших галактиках отдельные звезды. Это позволило установить, что расстояния до них составляют миллионы световых лет, в несколько десятков раз больше, чем ожидалось. В 1929 г. Э. Хаббл открыл, что все галактики удаляются от нас со скоростью, пропорциональной расстоянию. Этот фундаментальный факт лег в основу современных моделей Вселенной. В конце 40-х годов О. Ю. Шмидт возродил на новой основе идею И. Канта об образовании Солнечной системы из холодного газопылевого облака. В начале 50-х годов В. А. Амбарцумян доказал, что процесс звездообразования продолжается и в настоящее время. Это открытие положило начало современной теории эволюции звезд. В конце 50-х — начале 60-х годов были



обнаружены совершенно новые объекты во Вселенной: пульсары, отождествленные в дальнейшем с сильно намагниченными нейтронными звездами, и квазары — еще не понятые до конца сверхмощные источники излучения, расположенные на невообразимо гигантских расстояниях в миллиарды световых лет.

Развитие физической теории и астрономических наблюдений дало возможность поставить на научную основу вопрос о строении и эволюции Вселенной в целом, что привело к выделению из астрофизики еще одного раздела — космологии.

*Космологией называется раздел астрономии, изучающий строение и эволюцию Вселенной в целом.*

В основу современных моделей Вселенной положена общая теория относительности, созданная в начале XX в. А. Эйнштейном. В этой теории свойства пространства и времени определяются движущейся материей. Исходя из этого построены модели Вселенной, учитывающие эволюцию не только отдельных тел, но и самой Вселенной в целом, с которыми мы подробнее познакомимся в последней главе курса. Сейчас же отметим, что процесс познания бесконечен и на каждом этапе мы только приближаемся к познанию абсолютной истины.

### Контрольные вопросы и задачи к главе I

1. Что называется созвездием? Какие звезды относятся к данному созвездию? Приведите примеры обозначения звезд.
2. Что такое планета? Каковы основные видимые отличия звезд и планет при наблюдении невооруженным глазом? А в телескоп?
3. В чем различия систем мира Птолемея и Коперника? Какие доказательства правильности последней вы можете привести?
4. Перечислите открытия Галилея, доказывавшие правильность коперниканской системы.
5. Параллакс одной звезды равен  $0,02''$ , другая звезда находится от Солнца на расстоянии 40 пк, третья — на  $2 \cdot 10^8$  а.е., а четвертая — на 100 св. лет. Расположите звезды в порядке увеличения расстояния их от Солнца.
6. Какая из звезд расположена ближе к Солнцу — та, расстояние до которой 25 пк, или та, до которой свет идет 60 лет?
7. Перечислите известные вам доказательства движения Земли вокруг Солнца и вращения ее вокруг своей оси.

## Глава II

### ВИДИМЫЙ МИР

#### § 3. НЕБЕСНАЯ СФЕРА И ЕЕ ВРАЩЕНИЕ. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ

**1. Небесная сфера.** Расстояния до звезд настолько превосходят размеры Земли, что любой наблюдатель на ее поверхности воспринимает их расположенными на внутренней стороне сферы, в центре которой он находится (см. § 1). Применение, казалось бы, столь примитивной модели — небесной сферы — оправдывается тем, что с ее помощью можно описать все изменения вида звездного неба для данного наблюдателя и различия в видимой картине для разных наблюдателей, каждый раз по-иному ориентируя и поворачивая эту сферу.

На поверхность сферы произвольного радиуса нанесем точки, взаимное расположение которых повторяет положение звезд на небе. Для этого достаточно, чтобы линии, соединяющие центр сферы и изображение каждой звезды, были параллельны истинному направлению от наблюдателя на звезду (рис. 12). Естественно, что нужно нанести изображения всех звезд, в том числе и тех, которые мы в данный момент или вообще в данном месте не видим. Эта сфера и будет моделью небесной сферы, или, как чаще говорят, — небесной сферой.

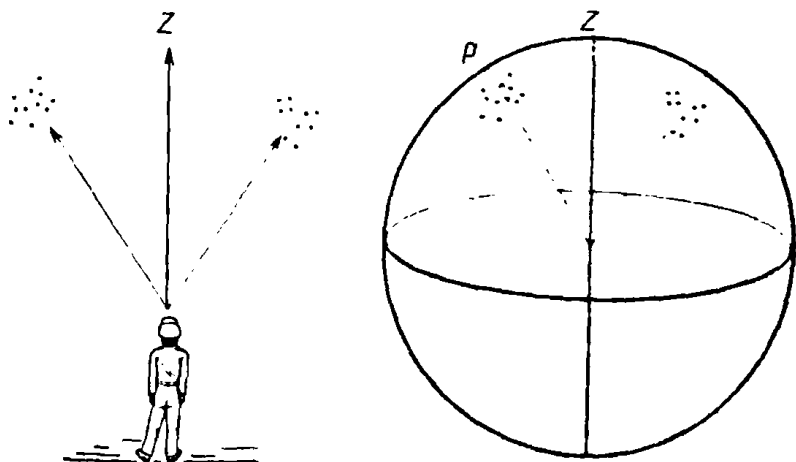


Рис. 12. Построение небесной сферы.

При помощи такой сферы очень удобно изучать видимое вращение неба, изменение положения светил и т. д. При сопоставлении моделируемых и наблюдаемых явлений нужно представлять себя находящимся в центре сферы.

**2. Основные точки и окружности небесной сферы.** Из-за вращения Земли нам кажется, что звездное небо вращается вокруг оси, проходящей через глаз наблюдателя и параллельной оси вращения Земли.

В северном полушарии вращение небесной сферы происходит по движению часовой стрелки (в направлении с востока на запад), если смотреть в южную сторону горизонта.

На снимке звездного неба (рис. 13), сделанном с выдержкой в

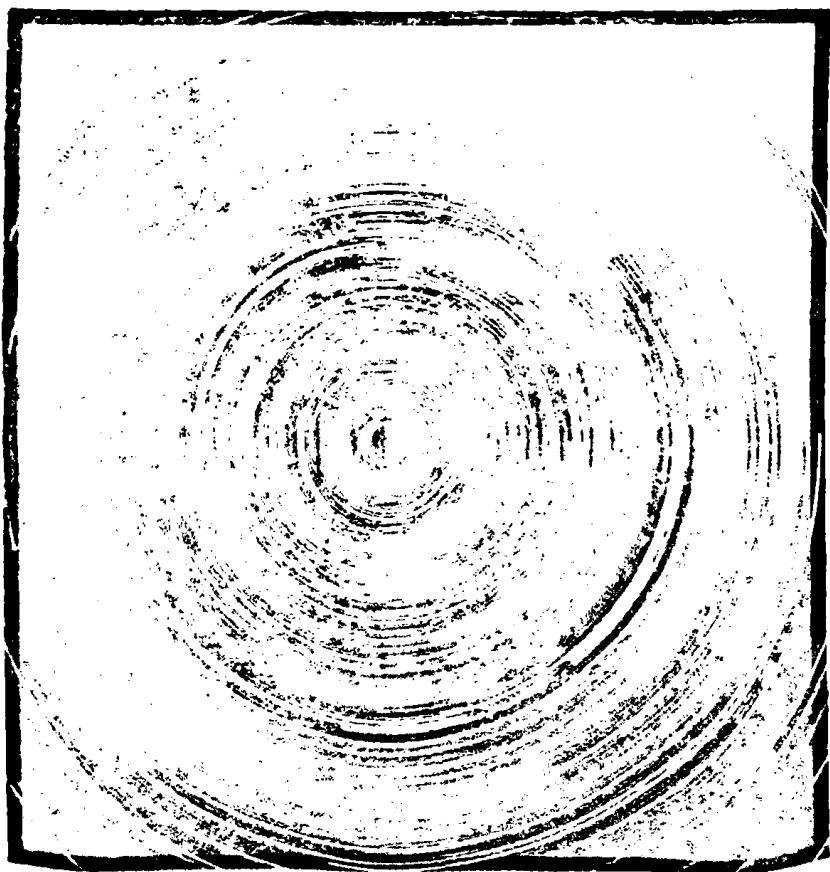


Рис. 13 Изображение околополюсной части неба. (Фотография сделана с экспозицией в несколько часов.)

несколько часов, видно, что изображения звезд описали на фото-пластинке дуги, центральные углы которых одинаковы. Общий центр этих дуг называется полюсом мира. Если вращение звезд вокруг полюса происходит против движения часовой стрелки, то он называется *северным*, если по движению, то *южным*. Отметим на небесной сфере точки полюсов и сориентируем ее так, чтобы ось, проходящая через полюса, была параллельна оси мира.

Проведем теперь для избранного нами наблюдателя прямую, параллельную вертикальной линии (рис. 14). Она пересечется с небесной сферой в двух точках. Одна из них, лежащая над головой, назы-

вается *зенит*, другая, расположенная под ногами, — *надир*.

Через центр сферы проведем плоскость, перпендикулярную вертикальной линии. Она называется *плоскостью математического горизонта*, а ее пересечение с небесной сферой — *математическим горизонтом* (слово «математический» в дальнейшем, там, где это не может вызвать путаницы, мы будем опускать). На небе математический горизонт соответствует видимому. Звезды, расположенные в нижней по отношению к горизонту полусфере, не видны наблюдателю.

Плоскость, проходящая через ось мира и зенит, называется *плоскостью небесного меридиана*, а окружность, образованная ее пересечением с небесной сферой, — *небесным меридианом* (слово «небесный» тоже будем опускать там, где это не вызовет путаницы).

**3. Высота полюса мира над горизонтом.** Угол между плоскостью горизонта и осью мира называется *высотой полюса мира над горизонтом*  $h_p$ . Он всегда равен широте места наблюдения, что легко доказать, используя рисунок 15. Углы  $h_p$  и  $\varphi$  равны как углы со взаимно перпендикулярными сторонами. На этом свойстве основаны методы определения географической широты.

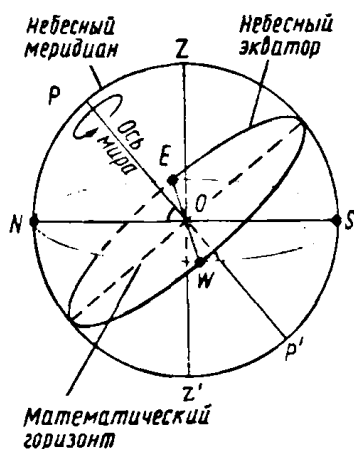


Рис. 14 Основные точки и окружности небесной сферы:  $P$  — северный полюс мира,  $P'$  — южный полюс мира,  $Z$  — зенит,  $Z'$  — надир,  $N$  — точка севера,  $E$  — точка востока,  $S$  — точка юга,  $W$  — точка запада

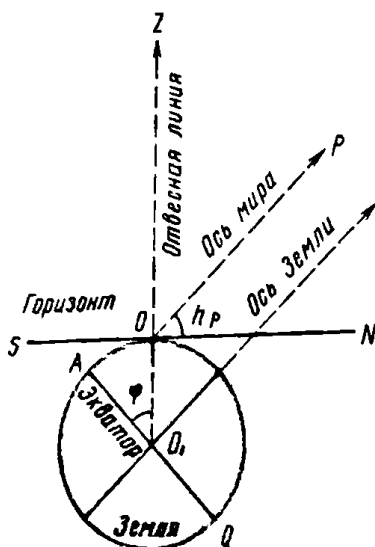


Рис. 15. Определение высоты полюса мира ( $h_p$ ) над горизонтом.

«небесный» в дальнейшем будем опускать, если это не вызовет путаницы). Экватор пересекается с горизонтом в двух точках (см. рис. 14), которые делят обе окружности пополам. Другие суточные параллели могут пересекаться с горизонтом, но точки пересечения делят их на неравные части (см. рис. 18, а). Если суточная параллель лежит ближе к северному полюсу мира, то под горизонтом находится меньшая ее часть, если ближе к южному, то под горизонтом расположена большая ее часть. Одна из суточных параллелей касается горизонта. Звезды, лежащие к полюсу ближе этой параллели, уже не пересекают горизонта и потому называются *незаходящими*. Их можно наблюдать в любое время суток. Аналогично звезды, расположенные около южного полюса мира и не пересекающие горизонт, называются *невосходящими*.

За время одного оборота небесной сферы каждая звезда дважды пересекает меридиан. Момент пересечения называется *кульминацией*. Кульминация будет *верхней*, если светило пересекает меридиан в той части, где находится зенит (дуга  $PZP'$ ), и *нижней*, если в той, где находится надир (дуга  $P'Z'P$ , рис. 16).

Отметим, что вертикальная линия, плоскости меридиана

**4. Вращение небесной сферы.** Отметим на небесной сфере звезду, которая в данный момент находится на горизонте, и приведем сферу во вращение. Видно, что в процессе вращения каждая звезда описывает окружность, плоскость которой перпендикулярна оси мира. Такое перемещение звезды (или другого светила) называется *суточным движением*, а окружности, описываемые светилами, — *суточными параллелями*.

Суточная параллель, плоскость которой проходит через центр сферы, называется *небесным экватором* (слово

и горизонта не участвуют во вращении небесной сферы, они жестко связаны с наблюдателем.

**5. Измерение времени.** Измерение времени требует наличия какого-либо периодического процесса, повторяющегося с высокой точностью. С древних времен таким процессом считалось вращение Земли. В соответствии с этим за единицу времени были выбраны сутки, или время одного оборота Земли вокруг своей оси.

*Истинными солнечными сутками называется промежуток времени между двумя последовательными одноименными кульминациями Солнца.*

Однако продолжительность истинных солнечных суток в течение года меняется. Поэтому за единицу времени принимают средние солнечные сутки, т. е. *промежуток времени, длительность которого совпадает со средней за год продолжительностью истинных солнечных суток.* По традиции сутки делят на 24 ч, час на 60 мин и минуту на 60 с.

Принято считать, что истинные солнечные сутки начинаются в момент нижней кульминации Солнца. Такое начало суток выбрано для того, чтобы смена дат происходила ночью, когда жизнь замирает. Начало средних суток может несколько отклоняться от этого момента, так как продолжительность средних и истинных солнечных суток совпадает только в среднем, но это отклонение не превышает 11 мин.

Наши часы отрегулированы по среднему времени.

#### § 4. ГОДИЧНОЕ ДВИЖЕНИЕ СОЛНЦА. ЭКЛИПТИКА. КАЛЕНДАРЬ

**1. Движение Солнца среди звезд.** Год. Солнце не остается неподвижным среди звезд. Точные наблюдения показывают, что оно движется по большому кругу, наклоненному к экватору под углом  $23^{\circ}27'$ . Это перемещение называется годичным движением Солнца, а круг, по которому оно совершается, — эклиптической. Эклиптика пересекается с экватором в двух точках, называемых точками равноденствия.

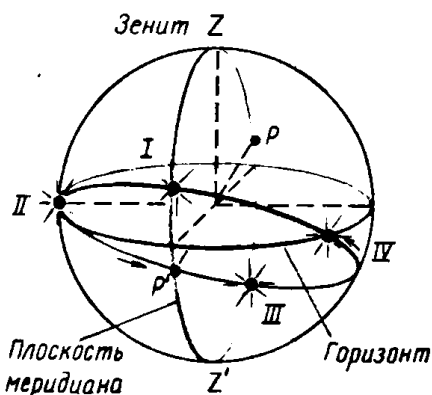


Рис. 16. Суточное движение светила: I — верхняя кульминация, II — заход, III — нижняя кульминация, IV — восход.

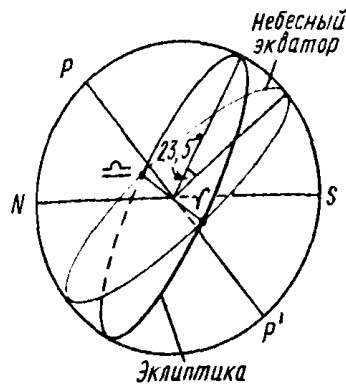


Рис. 17. Экватор и эклиптика:  $\gamma$  — точка весеннего равноденствия,  $\simeq$  — точка осеннего равноденствия.

но считать, что, участвуя в суточном движении, Солнце перемещается по суточным параллелям, которые, как мы знаем (см. § 3), параллельны экватору (рис. 18). В день равноденствия Солнце пересекает экватор и его суточный путь по небесной сфере для всех наблюдателей Земли совпадает с экватором (см. рис. 18). Следовательно, в этот день для любого наблюдателя Земли Солнце половину суток находится над горизонтом и половину — под ним, т. е. на всей Земле день равен ночи.

Двигаясь по эклиптике, в последующие дни Солнце отходит от экватора и начинает перемещаться по суточным параллелям, лежащим выше или ниже него (см. рис. 18, а), в зависимости

от того, переходит ли оно в северное или южное полушарие. В связи с этим изменяется продолжительность дня и ночи. Этот эффект тем более заметен, чем больше широта места наблюдения. Так, для наблюдателя на полюсе экватор совпадает с горизонтом и Солнце, пройдя точку равноденствия, в течение полугода будет оставаться над (или под) горизонтом, ежедневно перемещаясь по небу параллельно ему. Таким образом, день на полюсах длится полгода, такова же и продолжительность ночи.

На экваторе суточные параллели перпендикулярны горизонту и делятся им пополам (см. рис. 18, б). На нем день всегда равен ночи.

Солнце движется по эклиптике очень медленно, поэтому его расстояние от экватора в течение суток изменяется мало, и можно считать, что, участвуя в суточном движении, Солнце перемещается по суточным параллелям, которые, как мы знаем (см. § 3), параллельны экватору (рис. 18). В день равноденствия Солнце пересекает экватор и его суточный путь по небесной сфере для всех наблюдателей Земли совпадает с экватором (см. рис. 18). Следовательно, в этот день для любого наблюдателя Земли Солнце половину суток находится над горизонтом и половину — под ним, т. е. на всей Земле день равен ночи.

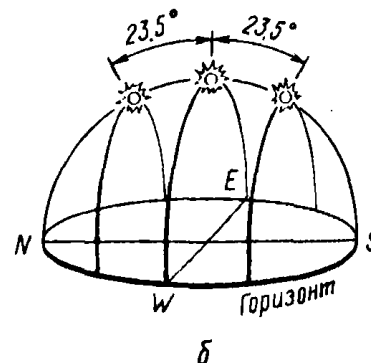
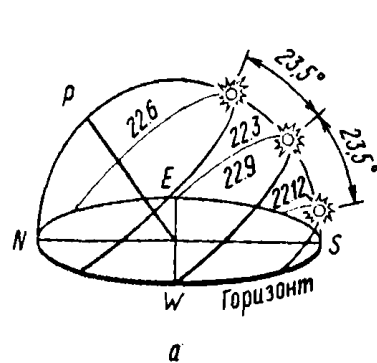


Рис. 18. Суточные параллели Солнца над горизонтом в различные дни года при наблюдении: а — в средних широтах, б — на экваторе Земли.

от того, переходит ли оно в северное или южное полушарие. В связи с этим изменяется продолжительность дня и ночи. Этот эффект тем более заметен, чем больше широта места наблюдения. Так, для наблюдателя на полюсе экватор совпадает с горизонтом и Солнце, пройдя точку равноденствия, в течение полугода будет оставаться над (или под) горизонтом, ежедневно перемещаясь по небу параллельно ему. Таким образом, день на полюсах длится полгода, такова же и продолжительность ночи.

На экваторе суточные параллели перпендикулярны горизонту и делятся им пополам (см. рис. 18, б). На нем день всегда равен ночи.

**2. Календарный счет времени.** Вся хозяйственная жизнь человечества всегда подчинялась двум циклам: суточной смене дня и ночи и годичному графику сельскохозяйственных работ. Поэтому необходимо было иметь единицу времени, кратную и суткам, и году. Такая единица называется календарным годом, а основанная на ней система счета времени (дней) — календарем. Календарный счет времени осложняется тем, что тропический год содержит не целое число суток.

Попытки создать календарь, которым можно было бы пользоваться достаточно длительное время, предпринимались еще в Древнем Египте. Однако первый удовлетворительный календарь был разработан только в 45 г. до н. э. римским астрономом Созигеном и введен в действие Юлием Цезарем. В этом календаре продолжительность года составляла 365 сут, т. е. он был короче тропического. Чтобы приблизить среднюю продолжительность календарного года к длительности тропического, каждые четыре года к февралю добавлялся один день. В Древнем Риме он назывался *bissextum* — второй шестой, откуда и пошло наше выражение «високосный год».

Таким образом, средняя продолжительность календарного года оказалась равной 365,25 сут, что на 0,0078 сут больше продолжительности тропического года. За 400 лет накапливается ошибка примерно в 3 сут, в результате весеннее равноденствие создавало затруднения в определении дней важных церковных праздников. Поэтому римский папа Григорий XIII в 1682 г. приказал пропустить в счете 10 дней, которые накопились к этому времени, и впредь не считать високосными те годы, номер которых оканчивается на два нуля, а число столетий не делится на 4. Этот

календарь получил название «новый стиль», и мы до сих пор пользуемся им. Расхождение со старым стилем (календарем Юлия Цезаря) в настоящее время составляет 13 сут.

Средняя продолжительность календарного года по новому стилю равна 365,2425 сут и ошибка в 1 сут набегает за 3300 лет.

## § 5. КООРДИНАТЫ НА НЕБЕСНОЙ СФЕРЕ.

### ЗВЕЗДНЫЕ КАРТЫ И КАТАЛОГИ

**1. Экваториальные координаты на небесной сфере.** Для описания положения светил на небесной сфере вводятся *экваториальные координаты*: склонение ( $\delta$ ) и прямое восхождение ( $\alpha$ ), аналогичные географическим координатам — широте ( $\varphi$ ) и долготе ( $\lambda$ ) (рис. 19).

*Склонение* — это *угловое расстояние светила от небесного экватора, измеренное по дуге большого круга, проходящего через светило и полюс мира*. Оно отсчитывается в пределах от 0 до  $\pm 90^\circ$  и считается положительным к северу от экватора и отрицательным — к югу.

*Прямое восхождение* — это *дуга экватора от точки весеннего равноденствия до точки пересечения того же большого круга с экватором*. Оно отсчитывается в направлении, противоположном суточному вращению небесной сферы, и изменяется в пределах от 0 до  $360^\circ$ . Однако в астрономии прямое восхождение чаще выражается не в градусах (и его долях), а в единицах времени и записывают их вверху, справа от числа, как и градус. При этом исходят из того, что небесная сфера делает 1 оборот ( $360^\circ$ ) за

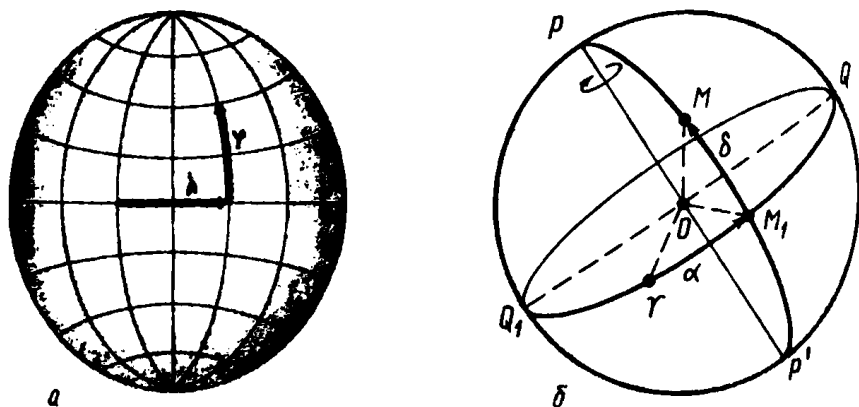


Рис. 19. Аналогия географических (а) и экваториальных (б) координат ( $QQ_1$  — небесный экватор,  $M$  — звезда).

24 ч, тогда за 1 ч она поворачивается на  $15^\circ$  ( $360^\circ:24 \text{ ч} = 15^\circ/\text{ч}$ ), а за 4 мин — на  $1^\circ$ . Как обычно,  $1''$  делится на  $60''$ , а  $1''$  — на  $60'$ . Тогда можно записать, что  $1''$  соответствует  $15^\circ$ ,  $1''$  —  $15'$ , а  $1'$  —  $15''$ . Например, прямое восхождение  $90^\circ$  соответствует  $6''$ , а  $6^{\text{ч}}54^{\text{м}} — 103^\circ30'$ . Эти же единицы иногда применяются и для измерения долгот на поверхности Земли.

Экваториальные координаты светила для любого наблюдателя на Земле одинаковы и не изменяются вследствие суточного движения сферы. Происходит это потому, что точки экватора, от которых они отсчитываются, участвуют вместе со светилом во вращении небесной сферы.

**2. Определение координат звезды и широты места наблюдения.** Для определения широты места наблюдения и координат звезды чаще всего применяется метод меридиональных наблюдений. При этом сначала определяют положение какой-либо незаходящей звезды на меридиане в моменты ее верхней и нижней кульминаций (точки  $M_1$  и  $M'_1$  на рис. 20). Как видно из рисунка 20, положение звезды в эти моменты определяется дугами  $SM_1$  и  $NM'_1$ , которые называются высотой светила в верхней или нижней кульминации соответственно ( $h_v$  и  $h_n$ ). Высота светила отсчитывается от горизонта (точки  $S$  и  $N$  на рис. 20) и считается положительной в северной полусфере. Она меняется в пределах от  $0$  до  $\pm 90^\circ$ . Звезды, имеющие отрицательную высоту, находятся под горизонтом, и наблюдать их нельзя. Напомним, что наблюдатель всегда находится в центре небесной сферы и для определения указанных дуг достаточно измерить соответствующие им центральные углы (они не показаны, чтобы не загромождать рисунок). Поскольку  $\widehat{SQ} = \widehat{Q_1N} = 90^\circ - \varphi$ ,  $\widehat{QM_1} = \widehat{Q_1M'_1} = \delta$ , то можно написать:

$$\begin{cases} h_v = 90^\circ - \varphi + \delta, \\ h_n = -90^\circ + \varphi + \delta. \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений, получим:

$$\delta = \frac{h_v + h_n}{2},$$

$$\varphi = 90^\circ - \frac{h_v - h_n}{2}.$$

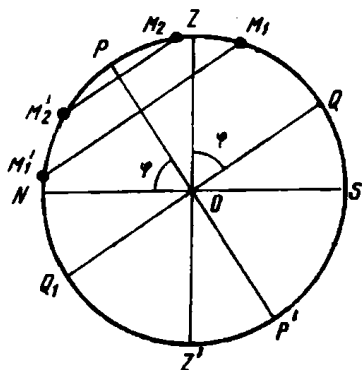


Рис. 20. Проекция небесной сферы на меридиональную плоскость.

Если известна широта места наблюдения, то для нахождения склонения любой звезды достаточно измерить ее высоту в верхней кульминации и воспользоваться первым уравнением указанной системы.

Прямое восхождение звезды определяют, тщательно измеряя промежуток времени между кульминациями звезды и Солнца. За этот промежуток времени небесная сфера повернется на угол, равный разности прямых восхождений звезды и Солнца (а его прямое восхождение всегда можно вычислить), что и дает возможность определить координату звезды.

**3. Звездные карты и каталоги.** Карты неба строятся аналогично картам Земли. На них наносится координатная сетка и изображения звезд. Диаметры кружков, изображающих звезды, пропорциональны их видимой яркости. Специальными значками отмечены переменные, двойные звезды, скопления, туманности.

Значительно чаще астрономы используют звездные каталоги. Звездный каталог — это список звезд, в котором даются их координаты и описываются те или иные особенности. Так, например, в каталогах положений приводятся только координаты звезд, вычисленные с максимально возможной точностью. Точные координаты звезд нужны прежде всего для определения географических координат. Кроме того, сравнивая координаты звезд, определенные в различные моменты времени, можно получить информацию о движении звезд, об изменении их координат из-за движения земной оси и др.

В других каталогах собраны сведения о двойных звездах. В них координаты приводятся с меньшей точностью, но зато даны сведения о звездах, входящих в данную двойную систему. Есть каталоги, в которых собраны сведения о других объектах Вселенной: туманностях, галактиках и т. д.

## § 6. ИЗМЕНЕНИЕ КООРДИНАТ СО ВРЕМЕНЕМ.

### ПРЕЦЕССИЯ, СОБСТВЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ ЗВЕЗД

**1. Прецессия земной оси.** Переопределяя координаты звезд, сравнивая их с найденными раньше, Гиппарх в середине II в. до н. э. обнаружил, что координаты всех известных звезд изменились. Исследуя эти изменения, он нашел, что плоскость небесного экватора медленно поворачивается навстречу годичному движению Солнца (т. е. в направлении с востока к западу на  $50,3''$  в год). Это движение было названо предварением равноденствий или пре-

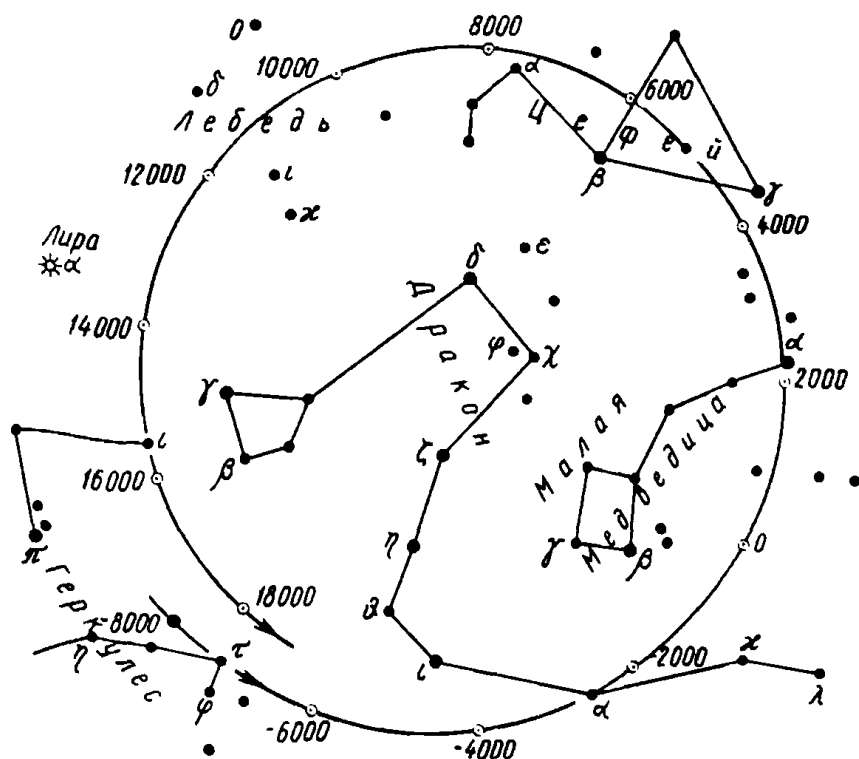


Рис. 21. Прецессия земной оси, путь полюса мира по небесной сфере

цессией, так как поворот плоскости экватора приводит к смещению точки весеннего равноденствия также навстречу кажущемуся годовичному движению Солнца и весеннее равноденствие происходит раньше, чем это было бы при неподвижном экваторе.

Поворот плоскости экватора эквивалентен перемещению оси вращения Земли\*, а следовательно, и полюсу мира, который движется среди звезд, описывая полный круг за 26 000 лет. На рисунке 21 видно, что 3—4 тыс. лет назад ближайшей к полюсу звездой была  $\alpha$  Дракона, в наше время — Полярная, или  $\alpha$  Малой Медведицы, а через 10 000 лет «полюрной звездой» будет ярчайшая звезда северного неба — Вега ( $\alpha$  Лыры).

\* Действительно, ведь полюс — это точка пересечения оси мира с небесной сферой, а ось мира всегда перпендикулярна плоскости экватора. И изменение положения одного (плоскости экватора) всегда связано с движением другого (полюса).



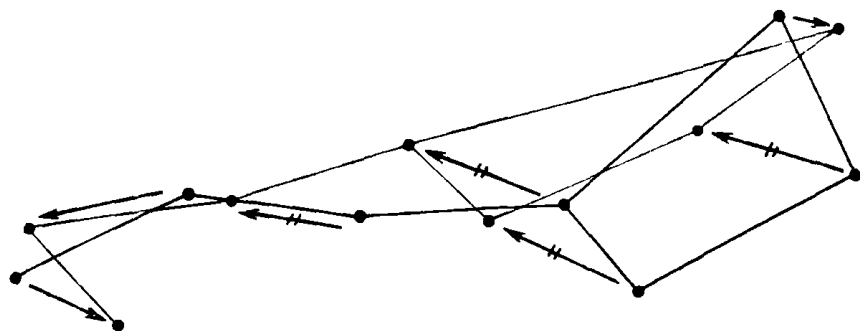


Рис. 23. Перемещение звезд Большой Медведицы за 100 000 лет. (Черные кружки — положение звезд в настоящее время, синие — через 100 000 лет. У четырех звезд одинаковые собственные движения (перечеркнутые стрелки), они расположены на одном расстоянии и входят в единую систему — скопление. Остальные звезды случайно проецируются в близкие места небесной сферы.)

движение звезд. Зная  $v_r$  и  $v_t$ , нетрудно по теореме Пифагора найти пространственную (полную) скорость звезды  $v$  (см. рис. 22, б):

$$v = \sqrt{v_r^2 + v_t^2}.$$

**3. Апекс.** Вероятно, каждый во время движения наблюдал, что окружающие его предметы, видимые в направлении движения, как бы расступаются, а находящиеся позади — смыкаются. Такой же эффект можно выявить при изучении собственных движений звезд. Исследуя собственные движения звезд, ученые обнаружили, что они разбегаются из точки, находящейся на границе созвездий Лиры и Геркулеса, с координатами  $\alpha = 240^\circ$ ,  $\delta = +34^\circ$ . Следовательно, эта точка, называемая **а п е к с о м**, определяет направление движения нашего Солнца относительно близко расположенных звезд. В указанном направлении Солнце движется со скоростью около 20 км/с.

## § 7. ДВИЖЕНИЕ ЛУНЫ. ЗАТМЕНИЯ

**1. Движение Луны вокруг Земли.** Заметить движение Луны среди звезд можно уже через 10—15 мин, не прибегая ни к каким астрономическим инструментам. Тщательное изучение ее движения привело к заключению, что Луна движется среди звезд по окружности большого круга, наклоненного к эклиптике приблизительно на  $5^\circ$ .

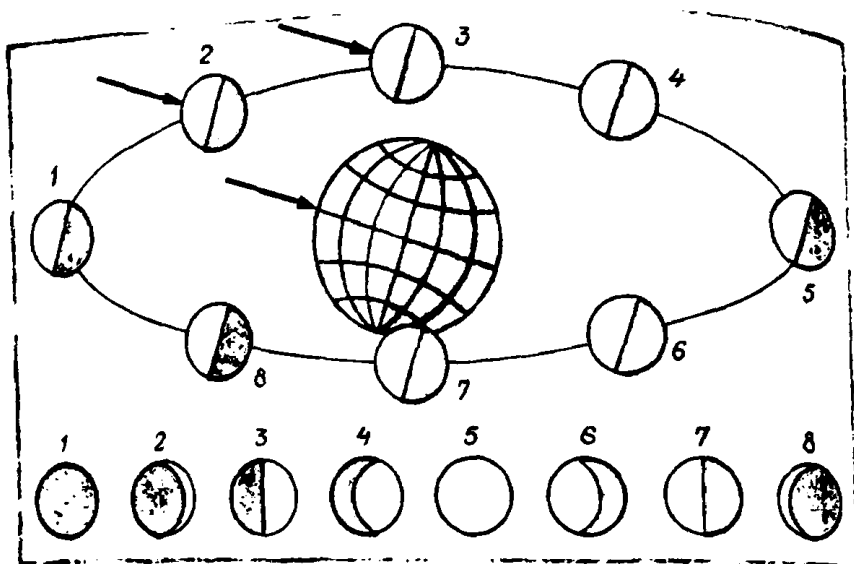


Рис. 24. Фазы Луны и ее движение вокруг Земли.

Период полного оборота Луны вокруг Земли относительно звезд называется сидерическим (звездным) месяцем. Его продолжительность — 27 дней 7 ч 43 мин 11,3 с.

Движение Луны относительно звезд сопровождается изменением формы ее видимой части (табл. 1). Это явление, называемое сменой фаз (рис. 24), обусловлено тем, что угол между направлениями от наблюдателя к Солнцу и Луне, равный раз-

Таблица 1

Фазы Луны

| Название фазы   | Вид Луны                                    | Угол между направлениями на Луну и Солнце | Время видимости |
|-----------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------|
| Новолуние       | Не видна (рис. 24, 1)                       | 0°                                        | Не видна        |
| Первая четверть | Полукруг выпуклостью к западу (рис. 24, 3)  | 90°                                       | Вечером         |
| Полнолуние      | Полный круг (рис. 24, 5)                    | 180°                                      | Всю ночь        |
| Третья четверть | Полукруг выпуклостью к востоку (рис. 24, 7) | 270°                                      | Утром           |

ности прямых восхождений Луны и Солнца (рис. 25), постоянно меняется и вследствие этого изменяется и видимая часть освещенного Солнцем полушария Луны.

Пусть в некоторый момент времени наступило новолуние (или любая другая фаза Луны). По прошествии сидерического месяца Луна совершит полный оборот вокруг Земли и займет относительно звезд то же положение. Но за это время Солнце годичным движением сместится в том же направлении почти на  $27^\circ$ , так как за сутки оно перемещается почти на  $1^\circ$  ( $360^\circ : 365 \text{ сут} \approx 1^\circ / \text{сут}$ ). Поэтому Луне придется затратить еще около двух суток, чтобы восстановилось относительное расположение Солнца и Луны (у них должны быть в момент новолуния одинаковые прямые восхождения) и снова наступило новолуние. Действительно, Луна за сутки по своей орбите смещается примерно на  $13^\circ$  ( $360^\circ : 27,3 \text{ сут} \approx 13^\circ / \text{сут}$ ), следовательно, ей необходимо двое суток, чтобы пройти дугу в  $27^\circ$  ( $27^\circ : 13^\circ / \text{сут} \approx 2 \text{ сут}$ ).

Таким образом, период изменения фаз Луны составляет примерно 29 сут.

*Период полной смены фаз Луны (промежуток времени между двумя последовательными наступлениями одной и той же фазы) называется синодическим месяцем. Он равен 29 дням 12 ч 44 мин 2,8 с. Лунная орбита пересекается с эклиптикой в двух точках, именуемых узлами лунной орбиты. Тот узел, в котором Луна переходит из северного полушария в южное, называется нисходящим, а противоположный ему — восходящим.*

**2. Затмения Луны.** Земля, освещаемая Солнцем, отбрасывает тень, имеющую форму конуса, причем ось конуса лежит в плоскости земной орбиты (плоскости эклиптики). Если в процессе своего движения Луна попадает в конус тени (рис. 26), то наступает *лунное затмение*. Оно может быть полным, если в область тени попадает вся Луна (на расстоянии Луны диаметр

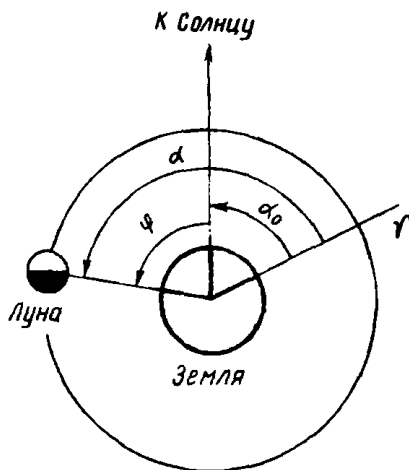


Рис. 25. Зависимость фазы от прямого восхождения Солнца и Луны.

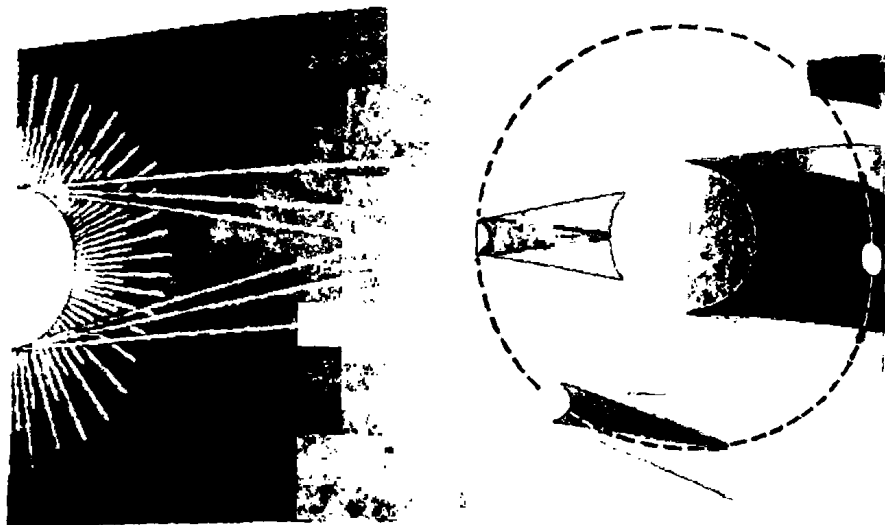


Рис. 26. Схема солнечных и лунных затмений.

земной тени примерно в 2,5 раза больше диаметра Луны), или частным, когда тень Земли покрывает только часть Луны. Продолжительность полного лунного затмения может достигать 1 ч 45 мин. Лунное затмение видно со всего ночного полушария Земли.

**3. Солнечные затмения.** Когда Земля попадает в тень Луны, наступает солнечное затмение. Из-за вращения Земли и движения Луны по орбите лунная тень скользит по поверхности Земли, очерчивая полосу длиной около 15 000 км и шириной не более 270 км. Внутри этой полосы наблюдается полное солнечное затмение (весь диск Солнца заслонен Луной), вне ее — частное солнечное затмение. Ширина полосы частного затмения достигает нескольких тысяч километров. Максимальная продолжительность полного солнечного затмения не более 7,5 мин.

В каждой данной точке Земли полное солнечное затмение повторяется в среднем один раз в 300 лет. Ближайшее полное затмение, видимое в Москве, будет в 2026 г. В XX в. на территории СССР произойдет 3 полных солнечных затмения, но условия их наблюдения будут неблагоприятными.

**4. Условия наступления затмений.** На рисунке 27 показаны проекции дисков Солнца и Луны на небесную сферу во время последовательных ново- и полнолуний. Угол между эклиптикой и орбитой Луны сильно преувеличен. Обратите внимание на то, что

на рисунке 27, б показано по одному положению проекции диска Луны и земной тени, а на рисунке 27, а — три проекции диска Луны и одна проекция диска Солнца. Это объясняется тем, что Луна расположена к нам очень близко и угол между направлениями на нее от наблюдателей, находящихся на противоположных сторонах Земли, составляет около  $2^\circ$ , поэтому каждый наблюдатель по-своему проецирует диск Луны на небесную

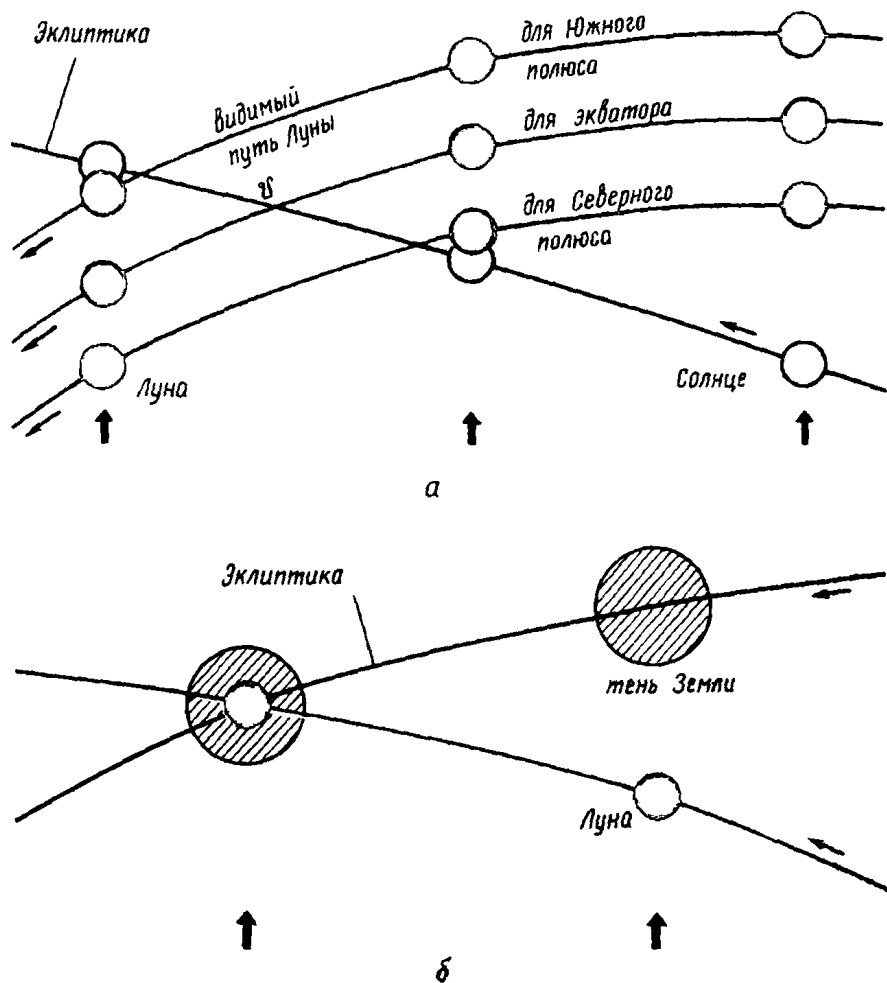


Рис. 27. а — Положение видимых дисков Солнца и Луны в моменты новолуний для наблюдателей на Южном и Северном полюсах Земли и на ее экваторе (  $\gamma$  - узел лунной орбиты); б — положение диска Луны и земной тени в моменты полнолуний для земного наблюдателя. (Стрелками отмечены ново- и полнолуния.)

сферу. Солнце же находится настолько далеко, что направление на него для всех наблюдателей одинаково и оно проецируется всеми наблюдателями в одну и ту же точку небесной сферы. Относительное расположение конуса тени Земли и Луны одинаково для всех наблюдателей, поэтому на рисунке 27, б только по одной проекции диска Луны и земной тени.

Лунное затмение возможно, если в момент *полнолуния* расстояние между центрами дисков Луны и земной тени меньше суммы их радиусов. Это условие выполняется, если в этот момент расстояние Солнца (или центра земной тени) от узла меньше  $11^\circ$ . Для солнечного затмения условие аналогично: расстояние между центрами дисков Луны и Солнца должно быть меньше суммы их радиусов в момент *новолуния*. Сравнение рисунков 27, а и 27, б показывает, что выполнению этого условия благоприятствует то, что для различных наблюдателей Луна видна в различных точках небесной сферы. Поэтому солнечное затмение возможно, если расстояние Солнца от узла не более  $16^\circ$ .

Двигаясь по эклиптике, Солнце проходит за сутки несколько меньше  $1^\circ$ . Поэтому зону, в которой может произойти солнечное затмение, оно проходит за 32 дня (16 до и 16 после прохождения узла). Но за это время обязательно будет одно или два новолуния, т. е. произойдет одно или два затмения. У другого узла картина повторится. Кроме того, Солнце, возвращаясь к первому узлу, может войти в зону затмений до окончания года. Таким образом, в течение одного года может произойти от двух до пяти затмений Солнца. А лунных может быть два, а может не быть вообще, так как за 22 дня, которые нужны Солнцу для прохождения зоны затмений, может не произойти ни одного полнолуния.

Уже древние египтяне знали, что если сегодня произошло солнечное (или лунное) затмение, то через 18 лет и 10 (или 11, в зависимости от числа високосных лет) суток оно повторится. Этот период называется *саросом*, на его протяжении происходит 71 затмение, из которых 43 солнечных и 28 лунных.

#### Контрольные вопросы к главе II

1. Опишите суточное движение Солнца в зависимости от времени года для северного и южного полушарий Земли.
2. Используя формулы пункта 2 § 5, выведите условие, при выполнении которого звезда будет: а) незаходящей, б) невосходящей.

3. Определите максимальное и минимальное склонение Солнца.
4. Воспользовавшись результатами предыдущих задач, определите те области Земли, в которых возможны полярная ночь и полярный день.
5. Напишите уравнение для высоты светила в верхней кульминации, если оно кульминирует к северу от зенита.
6. Полное лунное затмение произошло 15 мая. Когда произойдет очередное солнечное затмение?
7. На экваторе Земли наблюдалось полное солнечное затмение. Можно ли ожидать, что через две недели (в полнолуние) произойдет лунное затмение?
8. Почему лунные затмения, хотя и происходят реже, чем солнечные, в каждом данном месте Земли наблюдаются чаще солнечных?
9. Человеческий глаз определяет положение звезд с точностью в несколько минут дуги. Можно ли заметить изменение формы созвездия с XX в до н э, если собственные движения звезд в этом созвездии не превышают  $0,05''$  в год?
10. За сколько времени уменьшится вдвое расстояние от нас до звезды, если ее собственное движение равно нулю, лучевая скорость  $50 \text{ км/с}$ , а расстояние  $20 \text{ пк}$ ?

# Глава III

## МИР ТЯГОТЕНИЯ

### § 8. ЗАДАЧА ДВУХ ТЕЛ. ЗАКОНЫ КЕПЛЕРА

**1. Основная задача небесной механики.** Небесные тела, связанные силами всемирного тяготения, образуют системы, размеры которых много меньше расстояний между ними. Так, расстояние от Солнца до самой далекой планеты (40 а.е.) 7 500 раз меньше расстояния до ближайшей звезды (300 000 а.е.). Очевидно, что при расчете движения планет вокруг Солнца можно пренебрегать силами притяжения даже ближайших звезд. Аналогичное заключение можно сделать и для систем двойных и вообще кратных звезд. Все эти системы можно считать замкнутыми. Основной задачей небесной механики является расчет движения тел в таких системах.

**2. Задача двух тел. Законы Кеплера.** В простейшем случае рассматривается задача о движении в системе, состоящей из двух тел,— задача двух тел. При этом считается, что система отсчета связана с телом большей массы, которое является неподвижным. Тогда, как показал И. Ньютон, движение меньшего тела подчиняется трем законам Кеплера.

Первый закон Кеплера. Планета движется по плоской кривой второго порядка (эллипсу (1—4), параболе (5) или гиперболе (6)), в фокусе которой находится Солнце (рис. 28).

Второй закон Кеплера. Радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади (рис. 29).

Это утверждение эквивалентно тому, что скорость движения планеты уменьшается по мере удаления от Солнца.

Если подсчитать число суток, проходящих от дня весеннего равноденствия (21 марта) до дня осеннего равноденствия (23 сентября) и от 23 сентября до 21 марта следующего года, то окажется, что первый период на 7 сут длиннее второго. Другими словами, Земля зимой движется по орбите быстрее, чем летом. И действительно, самую близкую к Солнцу точку своей орбиты — перигелий — Земля проходит 6 января.

Третий закон Кеплера. Кубы больших полуосей орбит

планет относятся как квадраты периодов, умноженные на сумму масс планеты и Солнца.

$$\frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{T_1^2(M_\odot + m_1)}{T_2^2(M_\odot + m_2)},$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  и  $M_\odot$  — массы планет и Солнца,  $a_1$ ,  $a_2$  — большие полуоси орбит и  $T_1$ ,  $T_2$  — периоды обращения планет.

Законы Кеплера применимы к любой системе двух тел, движение которых происходит под действием сил тяготения, например планета и спутник, две компоненты двойной звезды и т. д.

В общем случае третий закон Кеплера может быть записан в виде:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M + m),$$

где  $M$  и  $m$  — массы тел системы,  $a$  и  $T$  — большая полуось и период обращения меньшего тела.

**3. Определение масс небесных тел.** Третий закон Кеплера предоставляет единственную возможность непосредственно определять массы небесных тел. Воспользовавшись этим законом, вычислим массу Солнца.

Для этого применим его сначала к системе Земля — Луна:

$$\frac{a_3^3}{T_3^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_\oplus + M_\text{л})$$

(значки  $\oplus$  и  $\text{л}$  относятся соответственно к Земле и Луне,  $a_3$  — большая полуось орбиты Луны,  $T_3$  — сидерический месяц, т. е. период обращения Луны вокруг Земли,  $M$  — массы), а потом к системе Солнце — Земля:

$$\frac{a_\oplus^3}{T_\oplus^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_\odot + M_\oplus)$$

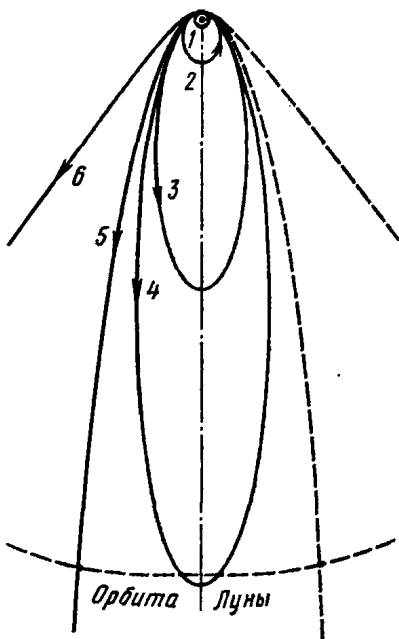


Рис. 28. Возможные орбиты в задаче двух тел.

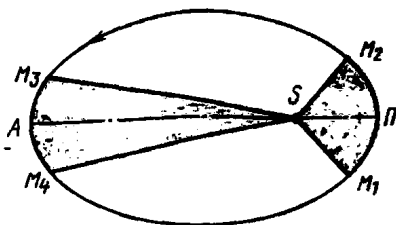


Рис. 29. Второй закон Кеплера. (Отмеченные цветом площади секторов эллипса равны.)

(здесь  $\oplus$  и  $\ominus$  относятся соответственно к Земле и Солнцу,  $a_{\oplus}$  — большая полуось земной орбиты,  $T_{\oplus}$  — тропический год, или период обращения Земли вокруг Солнца).

Поделив первое выражение на второе, получим:

$$\left(\frac{a_{\oplus}}{a_{\odot}}\right)^3 \left(\frac{T_{\oplus}}{T_{\odot}}\right)^2 = \frac{M_{\oplus} + M_{\odot}}{M_{\oplus} + M_{\oplus}}.$$

Поскольку масса Солнца намного больше массы Земли, а масса Земли, в свою очередь, намного больше массы Луны, то мы можем пренебречь меньшим слагаемым в каждой сумме и записать:

$$M_{\odot} = M_{\oplus} \left(\frac{a_{\oplus}}{a_{\odot}}\right)^3 \left(\frac{T_{\odot}}{T_{\oplus}}\right)^2.$$

Подставив сюда значения больших полуосей орбит Земли и Луны (149 500 000 и 384 000 км) и периодов обращения (365,2422 и 27,5 сут), получим, что масса Солнца в 330 000 раз больше массы Земли; так как масса Земли равна  $6 \cdot 10^{24}$  кг, то масса Солнца оказывается равной  $2 \cdot 10^{30}$  кг.

### Закон сохранения энергии и законы Кеплера (для дополнительного чтения)

Рассмотрим систему, состоящую из двух тел  $A$  и  $B$  с массами, соответственно равными  $M_A$  и  $M_B$ , причем для определенности примем, что  $M_A > M_B$ , и систему отсчета свяжем с телом  $A$ , т. е. будем считать, что оно неподвижно.

Вычислим полную энергию системы, которая равна сумме потенциальной и кинетической энергий всех тел системы. Очевидно, что кинетическая энергия

$$E_k = \frac{M_B v_B^2}{2},$$

где  $v_B$  — скорость тела  $B$ .

Для вычисления потенциальной энергии необходимо воспользоваться методами высшей математики\*, в окончательном виде

\* Выражение для потенциальной энергии получается следующим образом. По определению, приращение потенциальной энергии равно работе сил, действующих между телами системы, взятой с обратным знаком:  $\Delta E_p = -\Delta A$ . С другой стороны, работа

$$\Delta A = F \Delta s.$$

Полагая, что сила  $F$  есть сила всемирного тяготения, и учитывая, что работа сил тяготения не зависит от пути перемещения, получим:

она определится таким выражением:

$$E_p = - \frac{GM_B(M_B + M_A)}{r}.$$

Тогда для полной энергии системы получаем:

$$E = \frac{M_B v_B^2}{2} - \frac{GM_B(M_B + M_A)}{r}.$$

Согласно закону сохранения энергии, полная энергия системы есть величина постоянная. Отсюда следует вывод, что скорость тела  $B$  зависит только от его расстояния до тела  $A$ , в противном случае в выражении для полной энергии величина  $E$  не может быть постоянной. В задаче остается одна произвольная постоянная — значение полной энергии. Для ее определения необходимо задать значение скорости  $v_B$  в какой-либо точке траектории тела  $B$ . Тогда по формуле полной энергии мы сможем определить значение  $v_B$  в любой другой точке. Поскольку  $v_B$  задается произвольным образом (исходя из условий данной конкретной задачи), ясно, что полная энергия может иметь любой знак. Оказывается, что именно знак полной энергии определяет некоторые важные особенности движения.

Пусть для данной системы полная энергия отрицательна.

Тогда  $E = \frac{M_B v_B^2}{2} - \frac{GM_B(M_B + M_A)}{r} < 0$ , откуда следует:

$$\frac{GM_B(M_B + M_A)}{r} > \frac{M_B v_B^2}{2},$$

или  $r < \frac{2G(M_A + M_B)}{v_B^2}$ , т. е. тело  $B$  не может удалиться от тела  $A$

на расстояние большее, чем

$$r_{\max} = \frac{2G(M_A + M_B)}{v_B^2}.$$

---


$$dE_p = \frac{GM_B(M_B + M_A)}{r^2} dr.$$

Интегрируя это выражение, определим

$$E_p = - \frac{GM_B(M_B + M_A)}{r} + C.$$

Естественно принять, что потенциальная энергия на бесконечности равна нулю (на бесконечно большом расстоянии сила взаимодействия равна нулю, а следовательно, нет и энергии взаимодействия), поэтому и постоянная интегрирования также должна быть равной нулю. Тем самым получается выражение, приведенное для потенциальной энергии системы.

В этом случае система называется гравитационно связанной, а орбита тела  $B$  есть эллипс.

Если  $E > 0$ , то получим неравенство

$$\frac{GM_B(M_A + M_B)}{r} < \frac{M_B v_B^2}{2},$$

т.е. тело  $B$  может удалиться от тела  $A$  на любое сколь угодно большое расстояние. Система в этом случае называется гравитационно несвязанной.

Случай  $E = 0$  соответствует минимальной скорости, при которой тело может удалиться на бесконечно большое расстояние от тела  $A$ . Соответствующее значение скорости называется второй космической скоростью для расстояния  $r$ . Она равна

$$v_2 = \sqrt{\frac{2GM_A}{r}}.$$

Строгий математический анализ задачи двух тел, проведенный еще Ньютоном, показал, что движение тел в гравитационно связанной системе подчиняется законам, которые были установлены Кеплером в применении к Солнечной системе и которые носят его имя. Решение задачи двух тел, получаемое из закона Ньютона, позволяет найти значение постоянных величин, которые входят в математические соотношения, выражающие эти законы. Приведем формулировку первого закона в современном виде.

#### Первый закон Кеплера.

В гравитационно связанной системе тело  $B$  движется по эллипсу, в одном из фокусов которого находится тело  $A$ . В гравитационно несвязанной системе тело  $B$  движется по параболе ( $E = 0$ ) или гиперболе ( $E > 0$ ), в фокусе которой находится тело  $A$  (см. рис. 28).

Формулировки второго и третьего законов не меняются.

### § 9. ВОЗМУЩЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ. ВОЗМУЩАЮЩИЕ СИЛЫ.

#### ПРИЛИВЫ

1. **Задача многих тел. Возмущенное движение.** Задача двух тел имеет лишь ограниченное применение. В большинстве случаев система содержит несколько тел, например в Солнечную систему входят Солнце и 9 больших планет. Доказано, что получить решение этой задачи в виде алгебраических формул, позволяющих точно рассчитать положения и скорости всех тел системы в любой момент времени, в принципе невозможно. Решение такой задачи

получается приближенными методами, как результат сложных и трудоемких расчетов на современных ЭВМ. Однако в ряде случаев задача допускает существенные упрощения.

Так, в Солнечной системе масса всех планет в 700 раз меньше массы Солнца. Естественно, что сила притяжения планет также намного меньше силы притяжения Солнца. В случае Земли, например, сила притяжения Юпитера (самой большой планеты) составляет всего 0,00006 от силы притяжения Солнца. Поэтому в первом приближении можно ограничиться учетом только силы притяжения Солнца и считать, что планеты движутся согласно законам Кеплера. Рассчитанное таким образом движение называется кеплеровым.

Во втором приближении учитывается влияние других планет. Поскольку силы притяжения в этом случае невелики, их учитывают отдельно, т. е. сначала рассчитывают отклонение от кеплерова движения (его называют возмущением), вызванное одной планетой, потом другой и т. д. Вычисленные возмущения складывают и получают возмущенное движение.

В связи с началом межпланетных перелетов стало необходимо рассчитывать движение планет с точностью большей, чем может дать метод возмущений. Поэтому были разработаны новые способы расчетов, основанные на применении мощных ЭВМ. В наше время теория планетных систем достигла такого совершенства, что при расчете движения внутренних планет Солнечной системы допускается их отклонение от заданного места, не превышающее нескольких километров.

Обычно вычисления ведутся в системе отсчета, в которой центральное тело (обладающее большей массой) считается неподвижным. Но если выполнять расчеты в системе отсчета, связанной с центром масс системы, то окажется, что оба тела описывают эллипсы, большие полуоси которых обратно пропорциональны их массам. Так как центр масс движется прямолинейно и равномерно (система замкнута), то наблюдатель, находящийся вне системы, увидит, что большее тело движется по довольно сложной кривой, что свидетельствует о наличии второго тела, которое может быть по тем или иным причинам невидимым. Этот метод был применен в свое время при поисках спутника Сириуса, а в настоящее время используется для поиска иных планетных систем.

**2. Приливы.** Одно из практически важных явлений, которое

удалось объяснить возмущающим действием Луны и конечными размерами Земли,— приливы.

Приливом называется периодический подъем воды в океанах и морях, происходящий дважды в сутки.

Известно, что прилив наступает через некоторое время после кульминации Луны в месте наблюдения. Более того, приливы особенно сильны в дни ново- и полнолуний, т. е. когда центры Солнца, Луны и Земли располагаются примерно на одной прямой. Учитывая это, И. Ньютон объяснил приливы действием сил тяготения со стороны Луны и Солнца.

Рассмотрим более подробно приливы, вызываемые притяжением Луны, так как воздействие Солнца существенно меньше.

Запишем ускорения, вызываемые притяжением Луны, для разных точек Земли, учитывая, что эти ускорения в одной и той же точке пространства для всех тел одинаковы. В системе отсчета, связанной с центром масс Земля — Луна, значения ускорений будут

$$a_A = \frac{GM_L}{(R_\oplus + r)^2}; \quad a_O = \frac{GM_L}{r^2}; \quad a_B = \frac{GM_L}{(r - R_\oplus)^2},$$

где  $a_A$ ,  $a_O$ ,  $a_B$  — ускорения, вызванные притяжением Луны, в точках  $A$ ,  $O$ ,  $B$  (рис. 30),  $M_L$  — масса Луны,  $R_\oplus$  — радиус Земли,  $r$  — расстояние между центрами Земли и Луны (для расчетов его можно принять равным  $60R_\oplus$ ).

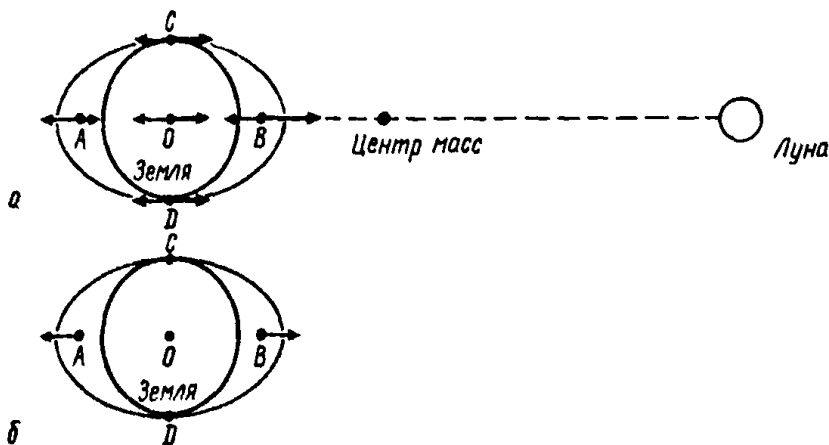


Рис. 30. *а* — Ускорения, вызванные притяжением Луны, в системе отсчета, связанной с центром масс системы Земля — Луна (синим цветом выделены ускорения, вычитаемые при переходе к системе отсчета, связанной с центром Земли); *б* — приливные ускорения в системе отсчета, связанной с центром Земли.

Но мы живем на Земле и все наблюдения проводим в системе отсчета, связанной с центром Земли, а не с центром масс Земля — Луна. Чтобы перейти в эту систему отсчета, необходимо из всех ускорений вычесть ускорение центра Земли. Тогда

$$a'_A = a_A - a_{\text{ср}} = GM_{\text{з}} \left( -\frac{1}{(R_{\text{з}} + r)^2} - \frac{1}{r^2} \right); \quad a'_O = 0;$$

$$a'_B = GM_{\text{з}} \left( -\frac{1}{(r - R_{\text{з}})^2} - \frac{1}{r^2} \right).$$

Выполним действия в скобках и учтем, что  $R_{\text{з}}$  мало по сравнению с  $r$  и им можно пренебречь. Тогда

$$a'_A = -\frac{2GM_{\text{з}}R_{\text{з}}}{r^3}; \quad a'_B = \frac{2GM_{\text{з}}R_{\text{з}}}{r^3}.$$

Ускорения  $a'_A$ ,  $a'_B$  одинаковы по модулю, но противоположны по направлению, каждое направлено от центра Земли.

Ускорения, возникающие в системе отсчета, связанной с данным телом, из-за того, что вследствие конечных размеров этого тела разные его части по-разному притягиваются возмущающим телом, называются приливными ускорениями, а силы, им соответствующие, — приливными силами.

Наблюдаемое в точках  $A$  и  $B$  ускорение свободного падения представляет собой векторную сумму ускорения, вызываемого силой тяжести, и приливного. Поэтому оно в точках  $A$  и  $B$  меньше, чем в точках  $C$  и  $D$  (см. рис. 30), где приливные ускорения равны нулю. Давление воды в океане на одном и том же геометрическом уровне (на одинаковом расстоянии от центра Земли) должно быть одинаковым. Давление столба воды определяется выражением  $p = \rho gh$ . Ясно, что высота столба  $h$  должна быть больше в тех местах, где ускорение свободного падения меньше, другими словами, в точках  $A$  и  $B$  должен наблюдаться подъем уровня воды — прилив.

Учет всех влияний приводит к картине приливной волны, бегущей по поверхности Земли. Эта волна включает и прилив в твердой оболочке Земли\*, высота которого достигает 30 см. Мы не замечаем его только потому, что поднимаемся и опускаемся вместе со всем окружающим.

Приливная волна отступает к востоку вращением Земли, и

\* Под действием приливных сил твердое тело Земли деформируется, растягиваясь вдоль линии  $AB$  (рис. 30) до тех пор, пока силы упругости не скомпенсируют приливы. Это и есть прилив в твердой оболочке Земли.

прилив наступает несколько позже кульминации Луны. Сложное взаимодействие приливной волны и Луны, процессы внутреннего трения приводят к тому, что полная энергия системы Земля — Луна уменьшается. В результате сутки удлиняются, а Луна постепенно отодвигается от Земли, что приводит к удлинению месяца.

В настоящее время сутки увеличиваются на 0,000017 с в год. Это очень малая величина, но через 1,5 млрд. лет их продолжительность увеличится в 40 раз. Поскольку и месяц к этому времени удлинится до 40 современных суток, то Луна и Земля будут двигаться, повернувшись друг к другу одной стороной. К этому времени приливы, связанные с Солнцем, вызовут обратный процесс, и Луна начнет приближаться к Земле. Примерно еще через 1,5 млрд. лет она подойдет к Земле настолько близко, что будет разорвана на части приливными силами.

Большой интерес для науки, в частности для геологии, представляет прошлая история системы Земля — Луна. К сожалению, эта задача значительно сложнее задачи расчета будущего. Пока можно только с уверенностью говорить, что в прошлом сутки были короче, Луна ближе, приливы выше.

## § 10. МЕХАНИКА КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

**1. Интеграл энергии.** Как только смолкнут двигатели ракеты-носителя, космический аппарат (КА) начинает полет по инерции, и его движение в дальнейшем определяется законами небесной механики, т. е. (в первом, достаточном для нас приближении) законами Кеплера. Кроме них, для объяснения наблюдаемых явлений нам понадобится еще одна формула — интеграл энергии:

$$v^2 = GM \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right),$$

где  $a$  — большая полуось орбиты,  $M$  — масса центрального тела (масса спутника пренебрежимо мала),  $r$  — расстояние от фокуса орбиты (начала отсчета) до спутника в данный момент времени,  $v$  — модуль скорости спутника.

Эта формула получается из закона сохранения энергии. Большая полуось параболы считается бесконечно большой, а гиперболы — отрицательной. В этом случае формула интеграла энергии применима к любому движению в поле сил тяготения.

**2. Искусственные спутники Земли.** Движение искусственного

спутника Земли (ИСЗ) происходит по эллиптической (в частном случае — круговой) орбите. По первому закону Кеплера, она представляет собой плоскую кривую, причем плоскость, в которой она лежит, — плоскость орбиты — стремится сохранить свое положение в пространстве (относительно звезд). Так как Земля вращается, то во время каждого следующего витка спутник проходит над другой областью Земли и его путь на поверхности Земли (имеется в виду путь точки, которая в любой заданный момент лежит на поверхности Земли точно под спутником) представляет собой довольно сложную спираль.

Точка орбиты, наиболее близкая к Земле, называется перигеем, а наиболее удаленная — апогеем.

Перигей орбиты выбирается обычно выше 200—300 км над земной поверхностью, так как ниже сильно сказывается сопротивление воздуха, что ограничивает время существования спутника.

Как правило, перигеем орбиты является точка отделения спутника от ракеты-носителя. В ней скорость направлена горизонтально и ее значение полностью определяет большую полуось орбиты, а следовательно и ее форму. Период обращения ИСЗ вычисляется по третьему закону Кеплера:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM_{\oplus}}}.$$

Из этого равенства можно получить формулу для расчета периода обращения спутника в минутах, подставив в него значения постоянных величин, выраженных в соответствующих единицах:

$$T = 1,65 \cdot 10^{-4} \sqrt{(6378 + h)^3},$$

здесь высоту орбиты спутника  $h$  надо выражать в километрах.

Увеличивая высоту полета спутника по круговой орбите, мы будем увеличивать и его период. На высоте 35 942 км период обращения ИСЗ станет точно равен суткам. При этом если плоскость орбиты спутника совпадает с экваториальной плоскостью, то ИСЗ оказывается «висящим» над одной и той же точкой земной поверхности. Такая орбита называется стационарной, а спутник стационарным. Стационарные спутники используются для ретрансляции радио- и телепрограмм и организации связи на больших расстояниях (обычно между континентами).

Иногда условия работы ИСЗ требуют, чтобы он проводил

максимальное время над определенной территорией земного шара. Так, на части территории СССР плохо видны стационарные спутники. Поэтому для ретрансляции телепрограмм в северные области страны используются ИСЗ типа «Молния», которые выводятся на сильно вытянутую эллиптическую орбиту с перигеем в южном полушарии. Высота перигея около 500 км, апогея — около 50 000 км. По второму закону Кеплера, скорость движения спутника в перигее намного больше скорости в апогее. В результате ИСЗ «Молния» большую часть времени проводит над северным полушарием, где он хорошо виден с территории Советского Союза. Казалось бы, целесообразно выбирать для таких ИСЗ орбиты с еще более низким перигеем. Но на меньших высотах сильнее сказывается сопротивление воздуха, которое немного уменьшает скорость спутника на каждом витке. При этом, как видно из формулы интеграла энергии, будет уменьшаться большая полуось орбиты. Это уменьшение происходит за счет понижения апогея (орбита эволюционирует к круговой). Для сохранения приемлемого срока службы ИСЗ приходится выбирать орбиту с достаточно высоким перигеем. Схемы орбит ИСЗ различного назначения приведены на рисунке 31.

**3. Перевод спутника с орбиты на орбиту.** Рассмотрим теперь очень важный маневр — перевод ИСЗ с одной орбиты на другую. Для определенности предположим, что нужно перевести ИСЗ с круговой орбиты, большая полуось которой равна  $a_1$ , на круговую орбиту с большой полуосью  $a_2$ , причем  $a_2 > a_1$ . Для такого перехода нужно сначала перевести ИСЗ на промежуточную

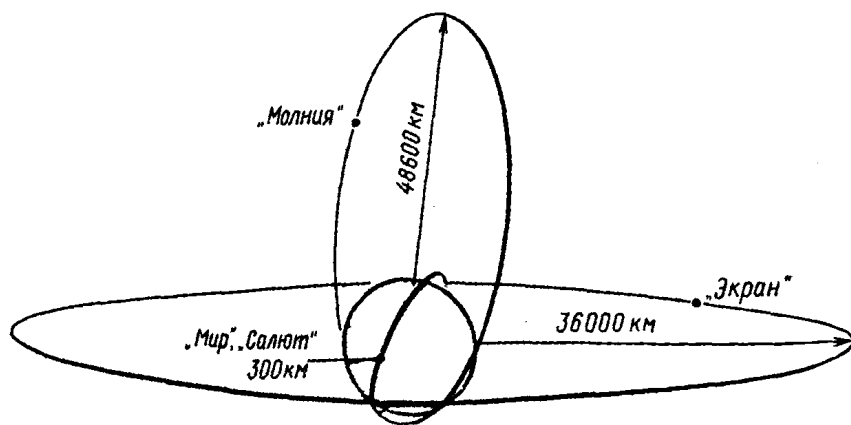


Рис. 31. Орбиты ИСЗ различного назначения.

орбиту, которая представляет собой эллипс, касающийся обеих круговых орбит (рис. 32).

Большая полуось такого эллипса (см. рис. 32) равна  $a_{np} = \frac{a_1 + a_2}{2}$ . Скорость ИСЗ, движущегося по круговой орбите с большой полуосью  $a_1$ , равна

$$v_1 = \sqrt{\frac{GM}{a_1}}.$$

Для перевода ИСЗ с одной орбиты на другую необходимо дать ему дополнительный импульс, чтобы его скорость была скоростью движения по промежуточной эллиптической орбите в точке А. Из интеграла энергии следует, что новая скорость равна

$$v_A = \sqrt{\frac{2GMa_2}{a_1(a_1 + a_2)}} = v_1 \sqrt{\frac{2a_2}{a_1 + a_2}}.$$

Очевидно, что  $v_A > v_1$ , т.е. мы должны ускорить спутник.

Однако когда спутник подойдет к точке В, его скорость окажется меньше, чем скорость движения тела по круговой орбите, проходящей через эту точку (так как кинетическая энергия спутника расходуется на увеличение потенциальной).

Используя интеграл энергии, можно написать, что в точке В спутник будет иметь скорость  $v_B$ , равную

$$v_B = \sqrt{\frac{2GMa_1}{(a_1 + a_2)a_2}} = v_2 \sqrt{\frac{2a_1}{a_1 + a_2}},$$

где  $v_2$  — скорость его на круговой орбите радиусом  $a_2$ . Следовательно, для перевода спутника на новую орбиту он должен получить дополнительный импульс, так как  $v_B < v_2$ .

Перевод спутника на более низкую орбиту производится аналогичным путем, только вместо ускоряющих импульсов спутник должен получать тормозящие.

Если стоит задача не только перевести спутник с одной орбиты на другую, но и произвести стыковку, то второй спутник-мишень должен находиться в момент начала ускорения первого

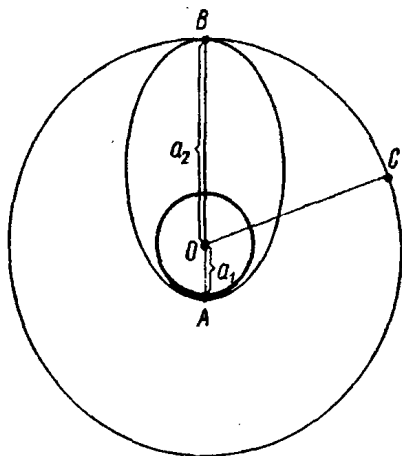


Рис. 32. Схема перевода ИСЗ с одной орбиты на другую.

в строго определенном месте орбиты (точка  $C$  на рис. 32). Угол  $AOC$  (см. рис. 32) рассчитывается по третьему закону Кеплера.

Перелет спутника от точки  $A$  до точки  $B$  по промежуточной орбите, согласно приведенной формуле третьего закона Кеплера, будет продолжаться  $T_1$  минут:

$$T_1 = 0,825 \cdot 10^{-4} \sqrt{a_{\text{пр}}^3}.$$

Так как период обращения спутника-мишени, согласно тому же закону, равен  $T_2$  минут:

$$T_2 = 1,64 \cdot 10^{-4} \sqrt{a_2^3},$$

то за время перелета он пройдет по орбите дугу, равную

$$360^\circ \cdot \frac{T_1}{T_2} = 180^\circ \cdot \sqrt{\frac{1}{8} \left(1 + \frac{a_1}{a_2}\right)^3}.$$

Поскольку эта дуга есть дуга  $CB$  (см. рис. 32), то указанная формула определяет и угол  $BOC$ .

Чтобы отправить космический аппарат (КА) к Луне, его выводят сначала на промежуточную круговую орбиту со сравнительно небольшим радиусом, после чего осуществляют маневр «стыковки» ИСЗ, летящего по низкой круговой орбите, с естественным спутником Земли — Луной, двигающейся по более высокой орбите. Формулы, полученные выше, вполне пригодны для описания такого полета.

**4. Приливные силы и движение ИСЗ.** Движение спутника происходит по законам небесной механики, но не всегда его можно считать материальной точкой, поэтому в отдельных случаях следует учитывать действие приливных сил. Рассмотрим это подробнее.

Приливные ускорения, т. е. ускорения, испытываемые всеми телами относительно центра тяжести ИСЗ, в симметрично расположенных точках (рис. 33) равны

$$a = \frac{2GM_{\oplus} l}{(R_{\oplus} + h)^3} \approx \pm g \frac{2l}{R_{\oplus}},$$

где  $a$  — приливное ускорение,  $M_{\oplus}$ ,  $R_{\oplus}$  — масса и радиус Земли,  $l$  — отклонение данной точки от центра тяжести ИСЗ вдоль линии, соединяющей центры Земли и спутника,  $g$  — ускорение свободного падения на поверхности Земли ( $9,8 \text{ м/с}^2$ ).

Приливные ускорения направлены всегда от центра тяжести ИСЗ.

Пусть на достаточно большом ИСЗ (орбитальной станции) на расстоянии 3 м от его центра тяжести находится предмет. Так как спутник совершает свободный полет (находится в состоянии невесомости), то движение предмета будет определяться исключительно микроускорениями, созданными приливными силами. Подставляя в указанную формулу известные данные ( $l=3$  м,  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup>,  $R_{\oplus}=6,378 \cdot 10^6$  м), получим, что приливное ускорение составляет всего около  $1 \cdot 10^{-5}$  м/с<sup>2</sup>. Но и при таком ускорении уже через 10 мин предмет окажется примерно в 2 м от первоначального положения.

Именно приливные силы обеспечивают те микроускорения, которые мешают добиться на ИСЗ и космических станциях полной невесомости. Но иногда приливные ускорения играют и положительную роль. Так, для многих спутников требуется постоянно сохранять ориентацию относительно Земли. Например, метеорологические спутники ведут непрерывную съемку облачного покрова. Естественно, что объективы аппаратуры спутника должны быть всегда направлены на Землю. Такая ориентация достигается использованием приливных сил.

Поместим на длинных и легких штангах небольшие грузы (рис. 34). Приливные силы, действующие на эти штанги, будут

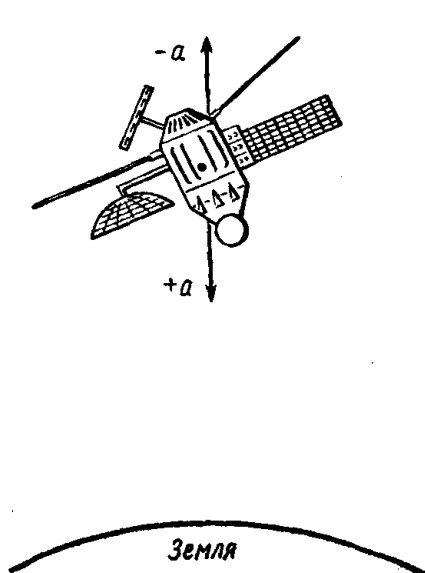


Рис. 33. Приливные ускорения на ИСЗ.

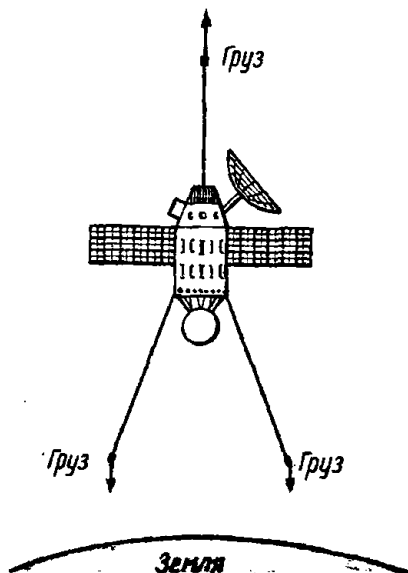


Рис. 34. ИСЗ, стабилизируемый приливными силами. (Для увеличения эффекта грузы выносятся на длинных штангах.)

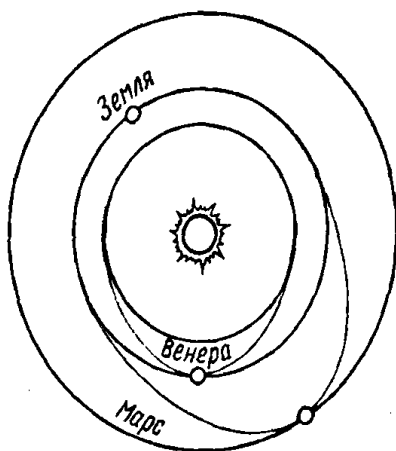


Рис. 35. Орбиты перелетов к Марсу и Венере.

стараться развернуть ИСЗ так, чтобы штанги расположились вдоль радиуса Земли. Тем самым будет обеспечена нужная стабилизация спутника. Однако полезный эффект в других условиях может оказаться вредным. Так, протяженную станцию (типа орбитального комплекса «Союз» — «Салют» — «Прогресс») приливные силы стремятся развернуть и ориентировать ее продольную ось вдоль радиуса Земли.

### 5. Межпланетные перелеты.

Схема межпланетного перелета напоминает схему перевода ИСЗ с одной орбиты на другую и стыковку со спутником-мишенью (рис. 35). Особенность заключается в том, что в начале своего движения спутник в системе отсчета, связанной с Солнцем, уже обладает скоростью, равной скорости движения Земли по орбите. Поэтому для перехода на промежуточную орбиту ему нужно придать только дополнительную скорость, равную

$$v_d = v_{np} - v_{\oplus} = v_{\oplus} \left( \sqrt{\frac{2a_{пл}}{a_{пл} + a_{\oplus}}} - 1 \right),$$

где  $v_d$  — дополнительная скорость,  $v_{\oplus}$  — скорость Земли, равная 29,8 км/с,  $v_{np}$  — скорость КА на промежуточной орбите в момент старта к другой планете,  $a_{пл}$  и  $a_{\oplus}$  — большие полуоси орбит планеты и Земли, выраженные в астрономических единицах.

Определим скорость, с которой должен стартовать с Земли космический аппарат. Пусть его стартовая скорость равна  $v_{ст}$ . Тогда в момент старта кинетическая энергия КА равна

$$E_k = \frac{mv_{ст}^2}{2}.$$

Чтобы удалиться на бесконечно большое расстояние, он должен израсходовать часть энергии на преодоление сил земного притяжения. Эта часть (как показано в § 8) равна той кинетической энергии, которую имеет тело, двигающееся со второй космической скоростью. Поскольку вторая космическая скорость на поверх-

ности Земли равна 11,2 км/с, то после удаления аппарата на достаточно большое расстояние от Земли его скорость (относительно Земли) определится из уравнения

$$\frac{mv_k^2}{2} = \frac{mv_{ст}^2}{2} - \frac{11,2^2 \cdot m}{2},$$

где  $\frac{mv_k^2}{2}$  — оставшаяся кинетическая энергия корабля, выраженная через его конечную скорость ( $v_k$ ). Чтобы КА достиг заданной планеты, его конечная скорость должна быть равна дополнительной скорости, этим и определяется стартовая скорость КА. Подставляя в равенство  $v_k = v_d$  значения величин и учитывая,

что круговая скорость Земли по орбите равна  $v_{\oplus} = \sqrt{\frac{GM_{\oplus}}{a_{\oplus}}} = 29,8$  км/с, получим:

$$v_{ст} = \sqrt{11,2^2 + 29,8^2 \left( \sqrt{\frac{2a_{пл}}{a_{\oplus} + a_{пл}}} - 1 \right)^2}.$$

При подлете к планете ракета будет иметь относительно нее некоторую скорость, определяемую разностью скоростей КА и планеты. Аналогично случаю стыковки спутников имеем:

$$v_{встр}^2 = v_{\oplus}^2 \frac{a_{\oplus}}{a_{пл}} \left( \frac{a_{\oplus} - a_{пл}}{a_{\oplus} + a_{пл}} \right),$$

где  $v_{встр}$  — скорость, с которой планета догоняет КА в момент встречи (или КА догоняет планету, в зависимости от того, какое выполняется соотношение:  $a_{пл} > a_{\oplus}$  или наоборот).

Кроме того, падающий на планету КА разгоняется ее гравитационным полем, приобретая энергию, равную кинетической энергии тела, движущегося со второй космической скоростью для этой планеты.

Поэтому для определения скорости падения КА на планету получим:

$$v_{пад}^2 = \frac{GM_{пл}}{R_{пл}} + v_{встр}^2,$$

где  $M_{пл}$ ,  $R_{пл}$  — масса и радиус планеты.

Время перелетов определяется по третьему закону Кеплера.

Расчет полета космического аппарата сделан в предположении, что он вылетает с Земли с наименьшей возможной скоростью, т. е. с минимальной затратой энергии. Такой запуск требует выполнения ряда условий с очень большой, часто не-

достижимой в практике точностью. Поэтому, как правило, запуск производится с несколько большей скоростью, что сильно сокращает время перелета и уменьшает требуемую точность.

### Контрольные вопросы и задачи к главе III

1. Вычислите большую полуось орбиты Юпитера, если его период обращения вокруг Солнца равен 12 годам.
  2. Почему движение планет происходит не точно по законам Кеплера?
  3. Спутники Юпитера и Земли движутся на одинаковых расстояниях от центров планет. Определите отношение периодов этих спутников.
  4. Почему вода в океане из-за прилива поднимается дважды в сутки?
  5. Почему максимальные приливы бывают во время полно- и новолуний?
  - 6\*. ИСЗ переводится с круговой орбиты, где  $a_1 = 1,25R_{\oplus}$ , на орбиту с  $a_2 = 5R_{\oplus}$ . Определите дополнительные скорости, которые нужно сообщить ИСЗ в точках пересечения промежуточной орбиты с начальной и конечной.
  7. Тот же вопрос, но начальная орбита имеет  $a_1 = 1R_{\oplus}$ , а конечная  $a_2 = 60R_{\oplus}$  (полет на Луну). Оцените время полета в одну сторону.
- У к а з а н и е. Можно воспользоваться интегралом энергии в форме

$$v^2 = 8^2 \left( \frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right),$$

где  $r$  и  $a$  измеряются в радиусах Земли, а  $v$  в километрах в секунду.

## Глава IV

### МИР ПЛАНЕТ

#### § 11. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Солнечная система состоит из девяти больших планет с их спутниками, нескольких тысяч малых планет (астероидов), комет, мелких метеорных тел, межпланетных пыли и газа (рис. 36). Происхождение, эволюция, законы движения всех тел, входящих в Солнечную систему, полностью определяются центральным телом — Солнцем. Границу Солнечной системы принято проводить там, где притяжение Солнца сравнивается с притяжением ближайших звезд. Точно указать ее невозможно, поэтому считают, что все тела, которые расположены и постоянно движутся в пределах 100 000—200 000 а.е. от Солнца, принадлежат к нашей системе. Другие планетные системы нам пока не известны.

Основная масса вещества Солнечной системы (исключая само Солнце) содержится в девяти больших планетах. Все они движутся по эллиптическим орбитам, в фокусе которых (общем для всех орбит) находится Солнце. Движение всех планет происходит в одном направлении. Планетные орбиты мало отличаются от кругов, а их плоскости наклонены друг к другу под неболь-

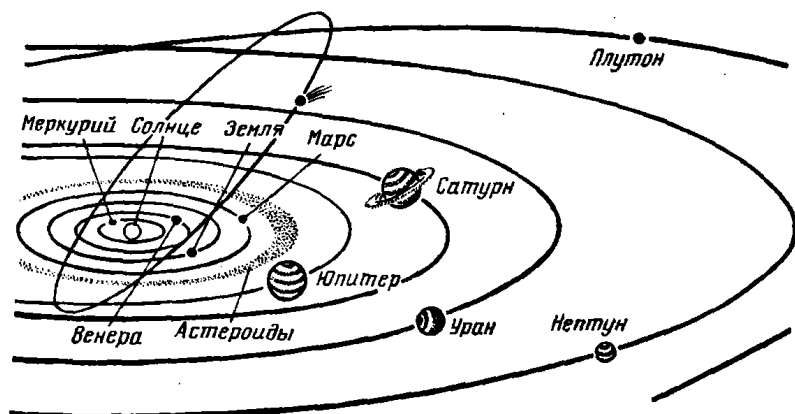


Рис. 36. Схема строения Солнечной системы.

шими углами. Столь же мало они наклонены и к плоскости солнечного экватора.

Большинство малых планет Солнечной системы движется между орбитами Марса и Юпитера. Однако есть астероиды, которые обращаются вокруг Солнца по очень вытянутым орбитам. Так, Гидальго может удаляться от Солнца дальше Сатурна, а Икар — заходить внутрь орбиты Меркурия. Иногда происходят сближения астероидов с Землей. Например, в 1976 г. Икар подошел к Земле всего на 7 млн. км. В том же году астероид Бетулия приблизился к Земле на 19,5 млн. км. Столкновение Земли с большим астероидом — событие настолько маловероятное, что может происходить не чаще чем один раз за сотни миллионов лет. Более того, ни один из известных нам в настоящее время астероидов не может подойти к Земле ближе, чем Икар.

Еще большее разнообразие орбит наблюдается у комет. Среди них есть такие, орбиты которых напоминают обычную астероидную орбиту. Так, комета Швассмана — Вахмана движется между Марсом и Юпитером, ближе к последнему. Есть кометы, обращающиеся вокруг Солнца по вытянутым эллипсам с большими полуосями в сотни и тысячи астрономических единиц. Многие кометы имеют параболические орбиты или во всяком случае такие, что мы не можем отличить их от парабол. Эти кометы покидают пределы Солнечной системы. Есть кометы (например, известная комета Галлея), которые движутся навстречу всем планетам и астероидам. Однако комет, пришедших к нам от других звезд, до настоящего времени не найдено.

Движение отдельных метеорных тел очень сложное, но многие из них образуют метеорные потоки, движущиеся по орбитам, подобным орбитам комет.

Все пространство Солнечной системы заполнено чрезвычайно разреженным межпланетным газом. Он представляет собой непрерывный поток вещества, с большой скоростью разлетающегося от Солнца по радиальным направлениям (солнечный ветер). Концентрация межпланетного газа очень мала: на расстоянии 1 а. е. от Солнца в объеме  $1 \text{ см}^3$  содержится всего от 1 до 10 частиц, в то время как в воздухе на уровне моря в таком же объеме содержится более чем  $10^{19}$  молекул.

Плотность межпланетного газа падает по мере удаления от Солнца, и на расстоянии 30—100 а. е. она уже неотличима от плотности межзвездной среды.

Мелкие метеорные тела и межпланетная пыль, возникающие при столкновениях астероидов и крупных метеорных тел, — очень недолговечные тела Солнечной системы. Дело в том, что свет, падая на тело, производит на него давление. На небольшое метеорное тело световое давление оказывает тормозящее действие\*, в результате чего его скорость все время уменьшается и оно приближается к Солнцу. На расстоянии примерно 3—5 радиусов от Солнца метеорное тело нагреется до температуры в тысячи кельвин и испарится. Совсем мелкие частицы — диаметром меньше микрометра — вообще не могут существовать в Солнечной системе, так как для них сила светового давления превышает силу притяжения Солнца и они выбрасываются в межзвездные просторы.

## § 12. ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАНЕТ ГРУППЫ ЗЕМЛИ

Изучение конкретных тел, входящих в состав Солнечной системы, начнем с больших планет. По своим характеристикам (массам, размерам, скорости вращения вокруг оси, химическому составу атмосфер и собственно планет) они делятся на две большие группы.

К первой группе (группе планет типа Земли) относятся четыре наиболее близкие к Солнцу планеты (Меркурий, Венера, Земля и Марс) и Луна, несмотря на то что она является спутником Земли. Дело в том, что по своему строению и внешнему виду Луна подобна планетам этой группы.

Все планеты группы Земли обладают сравнительно небольшими массами и размерами, но представляют собой весьма плотные тела. Средняя их плотность меняется от 3,5 до 5,5 по отношению к плотности воды.

Члены этой группы либо полностью (Луна, Меркурий) лишены атмосферы, либо имеют малопротяженную и не очень плотную атмосферу, масса которой составляет лишь ничтожную долю массы планеты. Основным химическим соединением в этих

---

\* Сила светового давления пропорциональна поверхности тела (т. е. квадрату диаметра — для шара), а сила всемирного тяготения — объему (для шара — кубу диаметра). Поэтому отношение этих сил уменьшается с увеличением размеров тела. Для планет световое давление абсолютно неощутимо, для мелких пылинок оно в сотни и тысячи раз превышает силу притяжения.

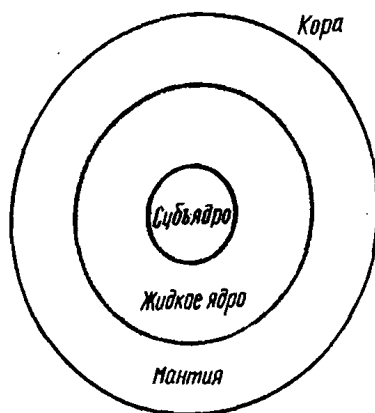


Рис. 37. Схема внутреннего строения Земли.

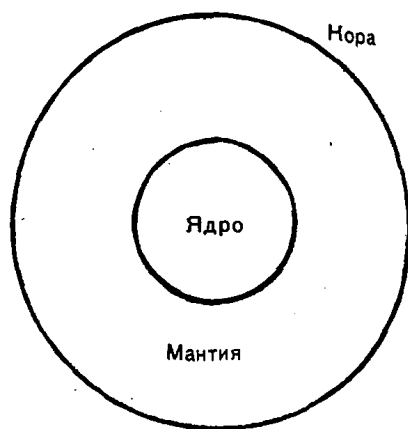


Рис. 38. Схема внутреннего строения Луны.

атмосферах является углекислый газ (Венера, первичная атмосфера Земли, Марс)\*.

Все планеты этой группы обладают сходным внутренним строением (отличия легко объясняются разной массой планет). Типичным (и наиболее хорошо исследованным) является строение Земли. По современным представлениям, в центре планеты расположено внутреннее ядро (субъядро) радиусом около 1300 км (рис. 37). Вещество этого ядра находится в твердом состоянии, его температура около 4500 К, давление  $3 \cdot 10^{11}$  Па (3 млн. атм), плотность около 12 г/см<sup>3</sup>. Относительно химического состава ядра единого мнения в науке нет: по одним теориям, он совпадает с химическим составом верхних слоев, по другим — внутреннее ядро состоит из железа с примесью серы и никеля. Внутреннее ядро окружено оболочкой толщиной около 2100 км, вещество которой, по-видимому, находится в жидком состоянии. Выше лежит мантия толщиной около 2900 км, а еще выше — кора, имеющая толщину 4—8 км под океанами и 40—80 км под материками.

У Луны, как говорят последние исследования, мантия занимает основную часть радиуса (рис. 38), возле самого центра располагается небольшое жидкое ядро, подобное ядру Земли.

Имеющиеся на сегодняшний день данные показывают, что

\* Современный состав атмосферы Земли обусловлен деятельностью зеленых растений.

внутреннее строение других планет группы Земли является промежуточным между строением Луны и Земли.

Только у двух планет этой группы имеются естественные спутники: у Земли — один (Луна), у Марса — два (Фобос и Деймос).

### § 13. ФИЗИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ПЛАНЕТ ГРУППЫ ЮПИТЕРА

Основное отличие планет группы Юпитера от планет группы Земли — их существенно большие размеры и массы. В то же время средние плотности этих планет значительно меньше плотности планет земной группы, что говорит о вероятном отличии химического состава и внутреннего строения планет-гигантов. Все планеты группы Юпитера обладают мощными атмосферами, в их спектрах наиболее хорошо видны полосы, образованные молекулами метана и аммиака. Однако основными компонентами атмосфер планет группы Юпитера являются водород и гелий. Объясняется это тем, что спектральные линии этих элементов при условиях, царящих в атмосферах планет-гигантов, проявляются только в далекой ультрафиолетовой части спектра, недоступной для наблюдений с Земли. Легко обнаруживаемые метан и аммиак составляют в действительности не более 0,1% массы атмосферы планет-гигантов.

Все планеты этой группы быстро вращаются. Причем у них отмечается интересная закономерность: скорость вращения неодинакова на разных широтах планеты. У экватора они вращаются заметно быстрее, чем на полюсах. Такой закон вращения характерен также и для Солнца. По-видимому, он типичен для тел, состоящих из газов. Поэтому следует ожидать, что если у этих планет и есть твердые ядра, то они невелики по сравнению с мощными атмосферами.

Все планеты группы Юпитера обладают развитыми системами спутников, кроме того,



Рис. 39. Кольца Сатурна.

Юпитер, Сатурн и Уран имеют кольца. Кольца Сатурна (рис. 39) хорошо видны даже в школьный телескоп. Они были открыты еще в XVII в. голландцем Х. Гюйгенсом. У Юпитера и Урана кольца обнаружили совсем недавно (в 70-е годы XX в.).

Точными измерениями, проведенными с ИСЗ и КА, установлено, что температура на видимой поверхности Юпитера выше той, которую он должен иметь, нагреваясь только Солнцем. Это говорит о том, что Юпитер обладает собственными источниками энергии, т. е. в некотором смысле его можно считать звездой (см. § 18 и 26, 27). В связи с этим были предприняты подробные расчеты внутреннего строения Юпитера, приведшие к интересным результатам.

Под облаками, состоящими из аммиака (кристалликов и капель) и составляющими видимую поверхность планеты, находится слой сернокислого аммония ( $(\text{NH}_3)_2\text{SO}_4$ ). Ниже его расположены облака из кристалликов льда, а еще ниже — из капелек воды. Эти облака плавают в водородо-гелиевой атмосфере. Солнечный свет проникает примерно на глубину 200—300 км, ниже находится царство ночи. Опускаясь еще ниже, мы заметили бы, что температура постепенно растет, начинает светлеть, и свет идет снизу. Объяснить это можно тем, что в глубине температура возрастает настолько, что вещество начинает излучать видимый свет. На глубине от 2 до 6,5 тыс. км (по разным вариантам расчета) находится нижняя граница атмосферы с температурой около 2000 К и давлением  $2 \cdot 10^{10}$ — $3 \cdot 10^{10}$  Па (200—300 тыс. атм). Здесь расположена «твердая» поверхность Юпитера. Эта поверхность представляет собой нечто вроде губки, наполненной жидкостью и газом, но без резкого перехода жидкой, газообразной и твердой фаз, она не похожа ни на что известное нам сегодня. Существенно ниже, на глубине около 18 000 км, водород переходит в металлическую фазу, еще глубже, у самого центра планеты, находится жидкое ядро из силикатных пород и металлов — железа, никеля.

Из общей массы Юпитера на долю водорода приходится 70%, гелия — примерно 20%, на все остальные элементы — менее 10% массы.

Строение и химический состав остальных планет группы Юпитера примерно такие же, с несущественными отличиями, вызванными тем, что массы этих планет много меньше, чем масса Юпитера.

#### § 14. ЛУНА

Более детальное изучение планет мы начинаем с нашего естественного спутника Луны не только потому, что она является ближайшим к нам и наиболее изученным небесным телом (многочисленные наблюдения с Земли, АМС, экспедиции), а, главным образом, потому, что Луна — типичнейший представитель планет земной группы.

Луна обращается вокруг Земли по слегка вытянутому эллипсу. Среднее расстояние до нее составляет 384 000 км. Периоды ее вращения вокруг оси и обращения вокруг Земли точно равны, поэтому Луна обращена к нам всегда одной и той же — видимой — стороной. Та сторона, которая никогда не видна с Земли, называется обратной. Обе стороны несколько отличаются друг от друга (рис. 40 и 41), впрочем, не больше, чем океаническое и материковое полушария Земли.

Если на Луну смотреть невооруженным глазом, то она видна как небольшой (угловой диаметр  $0,5^\circ$ ) яркий серебристый диск. В действительности Луна очень темное тело, отражающее только 7,3% падающего на нее света. Цвет ее поверхности, как свидетельствуют астронавты, сильно зависит от условий освещения, но в основном он темно-коричневый, иногда с зеленоватым оттенком.

Детали поверхности Луны, различимые невооруженным глазом, имеют размеры не менее 100 км в поперечнике, в телескоп можно рассмотреть детали размером в 1 км. Несмотря на это, даже до начала космических полетов удалось создать карты Луны намного более точные и подробные, чем географические карты Земли.

Поверхность Луны делится на светлые участки — материки и темные — моря. По традиции, эта терминология применяется и к другим планетам: темные пятна на их поверхности называются морями. В лунных морях никогда не было воды, они представляют собой огромные впадины глубиной до 3 км, дно которых покрыто темной лавой. Моря занимают около 40% площади видимой стороны. На обратной стороне Луны есть только одно небольшое море и много понижений, подобных морям, но не заполненных лавой (Море Мечты).

Наиболее характерной деталью лунного рельефа являются кольцевые горы (рис. 42), которые называются кратерами.

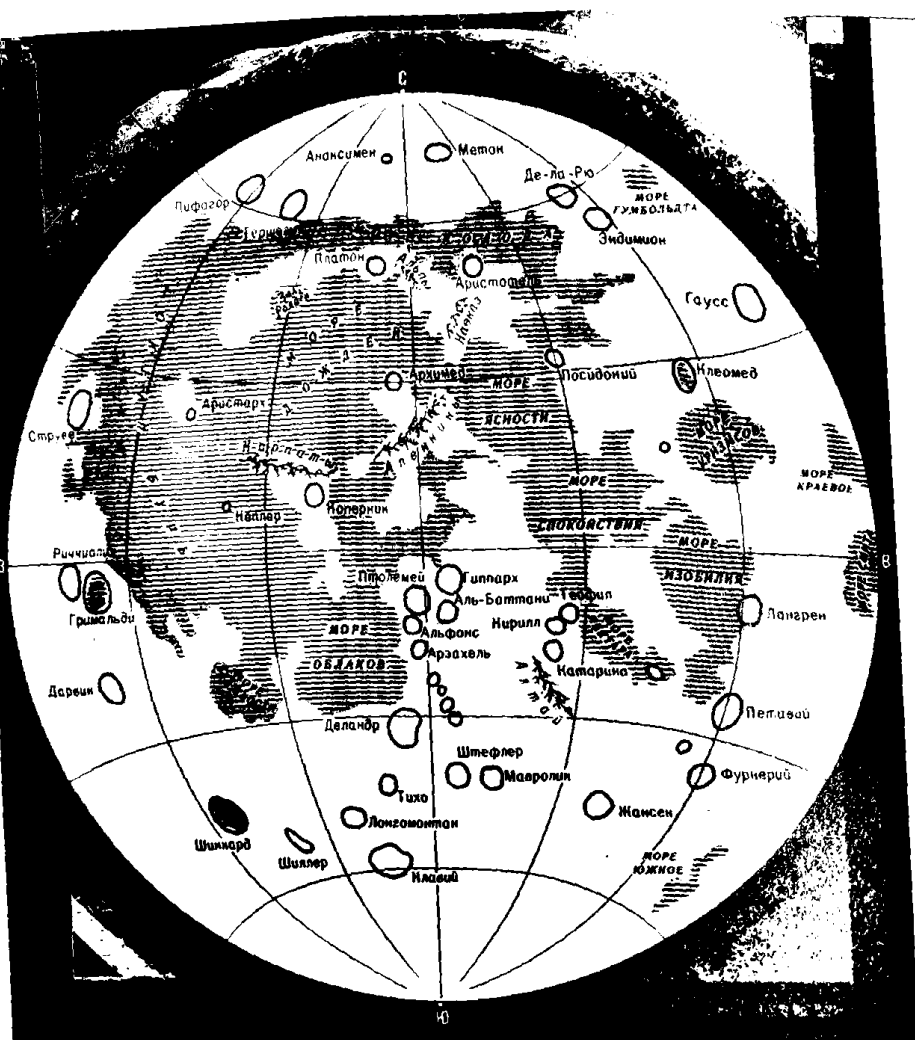


Рис. 40. Карта видимой стороны Луны.

Число кратеров на Луне огромно и не поддается сколько-нибудь точному подсчету. Достаточно сказать, что на видимой стороне только кратеров, имеющих диаметр более 3,5 км, насчитывается около 17 000. На обратной стороне их еще больше. С уменьшением же диаметров число кратеров быстро возрастает. Чаще всего кратеры встречаются на материках. В морях их меньше, кроме того, там они залиты лавой.

Все крупные детали рельефа Луны получили собственные име-

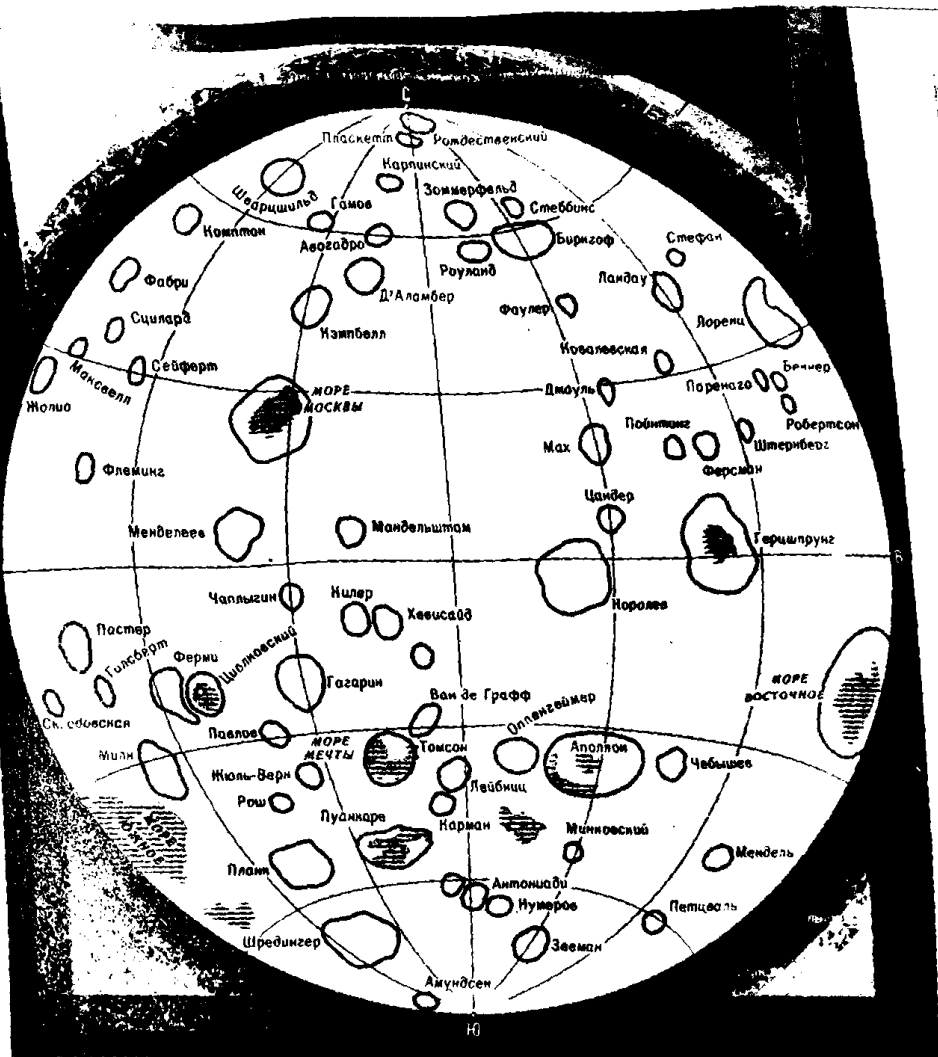


Рис. 41. Карта обратной стороны Луны.

на и названия (см. рис. 40). Большинство их было дано в XVII в. польским астрономом Я. Гевелием. Для морей он выбрал произвольные названия (*Море Ясности*, *Океан Бурь* и др.), кратерам дал имена крупнейших ученых (*Птолемей*, *Коперник*, *Аристотель* и др.), горным цепям — названия земных гор (*Апеннины*, *Кавказ*). Эти названия утвердились, и только в 1972 г. к ним добавилось новое: место прилунения первой лунной экспедиции было названо *Морем Познанным*.

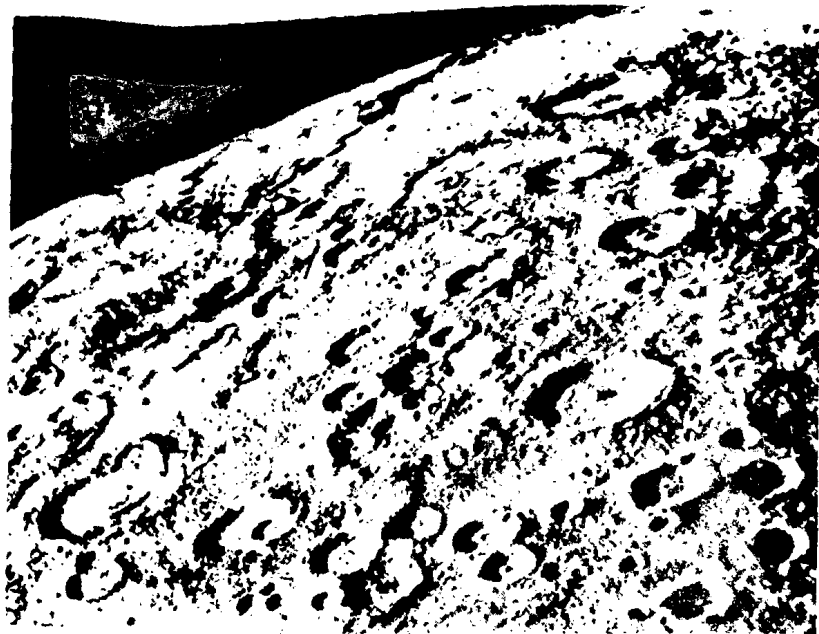


Рис. 42. Кольцевые горы (кратеры) на Луне (см. также верхний рисунок на переднем форзаце).

На правах первооткрывателей советские ученые дали названия объектам обратной стороны Луны (см. рис. 41). Единственное там море стало *Морем Москвы*, кратеры получили имена крупнейших ученых и космонавтов (*Циолковский, Ферми, Королев, Гагарин* и др.).

Луна полностью лишена атмосферы, поэтому физические условия на ее поверхности крайне суровые. В течение длинного (14,5 сут) лунного дня поверхность Луны нагревается до  $120^{\circ}\text{C}$ , но стоит зайти Солнцу, и температура стремительно падает до  $-180^{\circ}\text{C}$ . Отсутствие атмосферы приводит к непрерывной метеоритной бомбардировке и ничем не ослабленному воздействию солнечного ультрафиолетового, рентгеновского и корпускулярного излучений. Эти воздействия приводят к раздроблению горных пород и созданию грунта, отличающегося от любого известного на Земле. Лунный грунт получил название реголита. Результаты исследований образцов, доставленных на Землю, показали, что он состоит из спекшихся микроскопических обломков горных пород. В грунте были найдены хорошо известные на Земле ми-

нералы, вроде полевого шпата, образовавшиеся в условиях абсолютного вакуума и полного отсутствия воды. Новых минералов обнаружено очень мало. Химический анализ лунного грунта также не дал ничего сенсационного. Реголит отличается от земных пород, главным образом, малым количеством воды.

Особый интерес представляло определение возраста доставленных образцов. Оказалось, что современный облик Луны сформировался около 3,5 млрд. лет назад. Этот вывод очень важен для теории образования и эволюции планет.

Решен, наконец, и вопрос о происхождении лунных кратеров. В свое время выдвигались две гипотезы: кратеры — это жерла огромных вулканов; кратеры — следы падения гигантских метеоритов. Обе точки зрения оказались правильными. Большинство кратеров действительно ударного происхождения. Возникли они во время мощной метеоритной бомбардировки Луны и других планет около 3,5 млрд. лет назад. На Земле вода и воздух сгладили следы страшных катастроф, и сейчас геологи находят только отдельные «звездные раны» на поверхности нашей планеты. На Луне, Меркурии и Марсе процессы эрозии идут несравненно медленнее и следы падения метеоритов сохранились до нашего времени. Кратеров вулканического происхождения значительно меньше, но они, несомненно, есть.

Благодаря АМС и экспедициям, побывавшим на Луне, ее изучение стало возможным проводить геологическими и геофизическими методами. Основной вывод исследований заключается в том, что Луна застыла на той стадии эволюции, которую она вместе с Землей проходила около 3,5 млрд. лет назад. На Земле следы этой стадии практически полностью уничтожены временем. Именно то, что Луна представляет нам возможность изучать самые ранние стадии эволюции нашей планеты, делает ее исследование столь важным.

#### § 15. МЕРКУРИЙ

Для земного наблюдателя Меркурий представляется яркой звездой, появляющейся вблизи Солнца на западе или востоке. Поскольку он никогда не удаляется от Солнца более чем на  $28^\circ$ , наблюдать его довольно трудно.

Меркурий — ближайшая к Солнцу планета, что определяет своеобразность физических условий на его поверхности. Внешне он очень похож на Луну (рис. 43). Его поверхность также



Рис. 43. Меркурий.

усеяна кратерами, есть море, наблюдаются и другие характерные для Луны формы рельефа.

В полуденной точке, т. е. там, где Солнце стоит в зените, температура поверхности Меркурия достигает примерно 750 К ( $\approx 470^\circ \text{C}$ ), а к полуночи падает до 80—90 К ( $-180$ ,  $-190^\circ \text{C}$ ).

Близость планеты к Солнцу, практически полное отсутствие атмосферы и магнитного поля приводят к тому, что поверхность планеты подвергается непрерывной бомбардировке метеоритами, корпускулярными потоками, космическими лучами. Все это делает грунт планеты подобным лунному реголиту.

Период вращения Меркурия вокруг своей оси составляет точно  $2/3$  от периода обращения планеты вокруг Солнца.

Меркурий, как и спутники планет (исключая спутник Сатурна — Титан), лишен атмосферы. Сравнение физических характеристик Меркурия, спутников планет и других больших планет показывает, что единственной причиной отсутствия атмосферы является малая масса этих тел.

Известно, что температура характеризует среднюю кинетическую энергию, или среднюю скорость хаотического движения молекул газа. Но среди молекул газа всегда есть и такие, которые движутся со скоростью, в несколько раз превышающей среднюю. Такую скорость они приобретают в результате случайных столкновений. Молекула, скорость которой больше второй космической параболической скорости, покидает планету. Таким образом, атмосфера любой планеты постепенно рассеивается в пространстве. Темп этого процесса зависит только от отношения второй космической скорости к средней скорости хаотического движения. Если это отношение равно десяти, то для рассеяния атмосферы понадобятся десятки миллиардов лет, если четырем, то сотни миллионов, если двум, то несколько часов.

Параболическая скорость зависит от массы планеты, а скорость молекулы — от температуры и ее массы. Поэтому может оказаться, что водород (относительная молекулярная масса которого равна  $M_r = 10^{-3}$ ) давно покинул планету, а углекислый газ ( $M_r = 4 \cdot 10^{-3}$  и средняя скорость почти в 7 раз меньше скорости атома водорода при той же температуре) практически не покидал ее.

Этот эффект объясняет, в частности, некоторые особенности химического состава атмосферы Венеры, а также общие различия в химическом составе планет группы Земли и группы Юпитера (см. § 16, 18).

Планеты и спутники, обладающие малой массой, не смогли удержать свои атмосферы.

## § 16. ВЕНЕРА

Либо незадолго до восхода Солнца, либо сразу же после его захода соответственно на утреннем или вечернем небе можно увидеть очень яркую звезду. Люди, обладающие острым зрением, даже невооруженным глазом могут заметить, что эта звезда имеет крошечный диск, иногда она наблюдается в виде серпика, напоминающего серп Луны. Это планета Венера.

Венера по своим физическим характеристикам во всем подобна Земле (см. табл. II в приложении). Она обладает практически такой же массой и радиусом, имеет атмосферу, открытую еще М. В. Ломоносовым. Именно сплошной слой облаков Венеры обуславливает ее исключительную яркость и скрывает от нас поверхность этой планеты. Только развитие техники радиоастрономических исследований, завершившихся созданием радиокарты Венеры (рис. 44), и осуществление ряда межпла-



Рис. 44. Радиокарта поверхности Венеры.



Рис. 45. Панорама поверхности Венеры (см. также средний рисунок на переднем форзаце).

нетных полетов, увенчавшихся посадками на планету и передачей изображений ее поверхности, позволили приподнять покрывало таинственности, окутывавшее нашу небесную соседку.

Локационные измерения помогли установить, что Венера вращается вокруг своей оси (которая практически перпендикулярна плоскости орбиты) с периодом 243,16 сут относительно звезд в направлении, обратном направлению движения по орбите. В результате солнечные сутки на Венере равны 116,8 земным суткам.

Полеты АМС серии «Венера», спуск и посадка аппаратов на поверхность планеты позволили определить химический состав атмосферы, ее температуру и давление. Оказалось, что атмосфера Венеры состоит практически из чистого углекислого газа (97%); водяного пара и кислорода в ней очень мало (менее 0,1%). Температура на поверхности планеты около 750 К, она почти не зависит от времени суток и широты места. Давление в 93 раза превышает давление земной атмосферы на уровне моря.

Первоначальные атмосферы Земли и Венеры были близки по своему составу, но на Венере было меньше воды, что объясняется ее близостью к Солнцу. По той же причине и температура на ее поверхности была выше.

На Земле очень быстро образовались океаны и возникла жизнь. Углекислый газ растворился в воде, постепенно он поглощался живыми организмами, останки которых образовывали осадочные породы. Так весь выделившийся во время бесчислен-



ных вулканических извержений углекислый газ был переведен в связанное состояние и «захоронен» в горных породах. Там его содержится в 100 000 раз больше, чем в современной атмосфере Земли.

Иначе происходила эволюция Венеры. Океаны там не образовались, жизнь не возникла. Более того, молекулы воды расщеплялись ультрафиолетовым излучением Солнца, водород улетучивался в пространство, а кислород вступал в реакции с горными породами. Так на Венере не стало воды. Весь же выделившийся из недр углекислый газ остался в ее атмосфере.

Углекислый газ практически прозрачен для видимого света и очень сильно поглощает инфракрасное излучение. Поэтому атмосфера Венеры играет роль своеобразного «одеяла». Свет Солнца свободно достигает поверхности Венеры и нагревает ее. В свою очередь, нагретая поверхность планеты отдает энергию в виде инфракрасного излучения, которое поглощается атмосферой, в результате чего последняя нагревается. Это явление называется парниковым эффектом, так как оно наблюдается в парниках и теплицах, только роль атмосферы, поглощающей энергию, здесь играет стеклянная крыша. Именно в результате действия парникового эффекта на поверхности Венеры установилась высокая температура.

При наблюдениях с Земли кажется, что Венера закрыта сплошным слоем облаков, скрывающим от нас все детали по-



Рис 46. Перемещение облачной детали вследствие вращения Венеры.

верхности. Однако исследования, проведенные при помощи АМС серии «Венера», показали, что таких облаков, какие мы привыкли видеть на Земле, на Венере вообще нет. Оказалось, что за слой облаков наблюдатели принимали многокилометровый слой тумана, состоящий из громадного числа мельчайших капелек концентрированной серной кислоты. Аналогичный, но в несколько раз более тонкий слой был обнаружен и в атмосфере Земли на высотах около 25—30 км. Только в атмосферном слое Земли сами капли  $\text{H}_2\text{SO}_4$  примерно в 10 раз, а их число в единице объема в 100 раз меньше, чем на Венере. Наличие серной кислоты в атмосфере является следствием деятельности вулканов. О значительной вулканической активности Венеры говорит и то, что камни, видимые на панорамах (рис. 45), имеют острые грани и углы, что свидетельствует о их молодости (процессы эрозии еще не успели себя проявить), и то, что АМС фиксируют вспышки молний.

Мы говорили, что радиолокационные наблюдения установили 243-суточный период осевого вращения Венеры. Однако снимки, сделанные с космических аппаратов в ультрафиолетовом диапазоне (рис. 46), показали всего четырехсуточный период вращения. Эта загадка была решена блестящим экспериментом, проведенным АМС «Вега-1» и «Вега-2», с борта которых в атмосферу Венеры были запущены аэростаты. За их движением следили с Земли с помощью радиотехнических средств.

Наблюдения позволили установить, что в атмосфере Венеры на больших высотах дуют широтные ветры, скорость которых превышает 100 м/с. Такая скорость ветра вполне объясняет четырехсуточный период вращения облаков Венеры. Кроме того, были обнаружены вертикальные хаотические движения с порывами до нескольких или даже нескольких десятков метров в секунду. Полученные при помощи АМС «Вега» данные чрезвычайно важны для построения динамической теории атмосферы Венеры. В свою очередь, эта теория помогает разобраться и понять механизмы, управляющие погодой на Земле.

Радиолокационные наблюдения, о которых уже упоминалось, обнаружили на поверхности планеты большое число кратеров, подобных лунным. Это говорит о том, что в далеком прошлом Венера подвергалась сильной метеоритной бомбардировке.

#### § 17. МАРС

Марс — четвертая планета Солнечной системы, расположенная примерно в 1,5 раза дальше от Солнца, чем Земля. Земному наблюдателю он представляется как яркая звезда красного цвета.

Год на Марсе продолжается 687 земных или 667 марсианских суток (сутки на Марсе всего на 37 мин длиннее земных). Плоскость экватора планеты наклонена к плоскости ее орбиты на  $25^\circ$  (по сравнению с  $23^\circ 27'$  у Земли), поэтому на Марсе происходит смена времен года, аналогичная земной, только продолжительность каждого времени года там вдвое больше, чем на Земле.

Марс находится от Солнца дальше Земли, поэтому он может занимать на небе положение, при котором разность прямых восхождений Солнца и планеты равна  $180^\circ$ . Такое расположение светил называется противостоянием. У Марса оно повторяется через каждые 2 года и 2 месяца. Так как орбита Марса вытянута больше земной, то в моменты противостояний расстояния между Землей и Марсом могут быть различными. Раз в 15 или 17 лет происходит так называемое великое противостояние, когда расстояние между планетами минимально и составляет всего 55 млн. км.

По своим размерам и массе Марс занимает промежуточное положение между Землей и Луной, его диаметр примерно в 2, а масса в 9 раз меньше земной. Именно поэтому Марс обладает очень разреженной атмосферой. Она состоит в основном из

углекислого газа с примесью азота (2,5%) и аргона (1,5—2%). Ее давление около 6 гПа (оно сильно зависит от высоты места, но нигде не бывает больше 12 гПа).

Удаленность от Солнца, разреженная атмосфера обуславливают крайнюю суровость климата Марса. Температура на его поверхности в среднем ниже 0 °С. Только в отдельные моменты на экваторе она может достигать +23 °С, но к полуночи падает до -90 °С. Зимой на полюсах температура опускается до -125 °С, тогда из атмосферы выпадает снег из замерзшего углекислого газа (сухой лед).

Большой интерес представляет вопрос о наличии воды на Марсе. По мнению многих ученых, основные ее запасы сосредоточены в слоях подповерхностной вечной мерзлоты и в полярных шапках. При падении больших метеоритов лед плавится и вода выливается на поверхность, оставляя характерные следы, видные на снимках, сделанных при помощи АМС.

Вполне возможно, что в прошлом был период или периоды, когда на поверхности Марса температура несколько повышалась. Это приводило к повышенному выделению углекислого газа, что в результате парникового эффекта вело к увеличению температуры и появлению в атмосфере водяного пара. В результате давление атмосферы на Марсе могло достигать 100, а может быть, и 1000 гПа.

Большое значение придавалось решению вопроса о жизни на Марсе. Единого мнения на этот счет не было. Одни считали, что жизни на соседней планете нет, другие доказывали существование растительности и даже разумной жизни. Окончательный ответ был получен на основании прямого эксперимента. На космических аппаратах «Викинг», которые в 1976 г. спустились на поверхность Марса, были поставлены специальные эксперименты по обнаружению жизни вне Земли. В частности, аппараты автоматической химической лаборатории провели анализ грунта с целью поиска микроорганизмов. Результат решающего опыта с прибором, который обладал максимально возможной чувствительностью по отношению к сложным органическим соединениям, был полностью отрицательным, что говорит об отсутствии жизни.

Поверхность Марса по своему строению напоминает лунную (см. нижний рисунок на переднем форзаце). Она усеяна кратерами, но они носят на себе заметные следы атмосферной эрозии. Очевидно, что Марс на ранней стадии своего существования

подвергался интенсивной метеоритной бомбардировке. Кроме того, в формировании его поверхности значительную роль играли внутренние тектонические силы. Об этом свидетельствует, в частности, самый большой в Солнечной системе вулкан *Олимп*, диаметр которого у основания свыше 500 км, высота 27,5 км (рис. 47).



Рис. 47. Вулканический конус на Марсе «Олимп».

Помимо гор и вулканов, на Марсе обнаружен гигантский разлом — каньон *Маринера*, глубиной 5—6 км, шириной до нескольких десятков, а в отдельных местах до 200 км, тянущийся вдоль экватора на 3600 км. По-видимому, этот грандиозный разлом образован силами, аналогичными тем, которые разорвали древний единый материк Земли — Пангею, а в наше время вызывают движение материков.

Марс имеет два небольших спутника — *Деймос* (рис. 48) и *Фобос* (рис. 49). Ближайший к планете — Фобос расположен от ее поверхности на расстоянии всего в 600 км, Деймос — на рас-

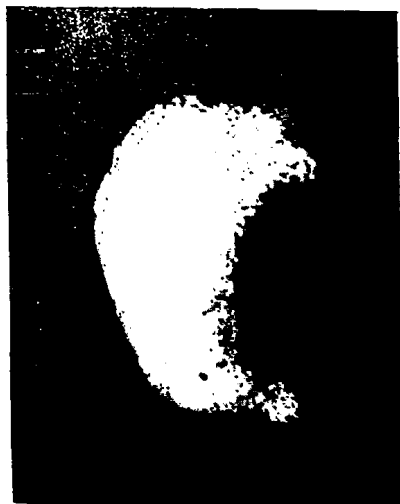


Рис. 48. Деймос.



Рис. 49. Фобос.

стоянии 20 000 км. Со спутниками связан ряд загадок. Например, непонятно, почему они находятся на почти круговых орбитах. Неправильная форма этих спутников (см. рис. 48 и 49) позволяет думать, что они представляют собой захваченные Марсом небольшие астероиды. Трудно понять, как мог уцелеть Фобос после удара крупного метеорита, образовавшего на его поверхности кратер диаметром около 8 км. (Сам Фобос — тело неправильной формы, размерами  $18 \times 22$  км, Деймос еще меньше —  $10 \times 16$  км.) Совершенно непонятна природа параллельных полос, хорошо видимых на поверхности Фобоса. Особенно интересно, что этот спутник — одно из самых черных тел, известных нам, его отражательная способность в 3 раза меньше, чем у сажки.

Планеты группы Земли в настоящее время изучены достаточно хорошо. Почти на всех (исключая Меркурий) побывали автоматические межпланетные станции, а на Луне — даже экспедиции. Полученные результаты показывают, что строение планет, а также скорость их эволюции определяются массой. Так, Луна застыла на самой ранней стадии эволюции, Марс находится на промежуточной, а Венера и Земля — на заключительной. Сравнение геологического строения планет, их поверхностей и атмосфер, изотопного состава вещества позволяет лучше узнать нашу Землю, имеет огромное значение для развития столь важной науки, какой является геология.

#### § 19. ЮПИТЕР, САТУРН И ДРУГИЕ ПЛАНЕТЫ-ГИГАНТЫ

Юпитер и Сатурн (см. рисунки на переднем форзаце) представляются невооруженному глазу в виде ярких звезд, выделяющихся ровным сиянием. Юпитер относится к самым ярким светилам неба, уступая только Венере. Уран и Нептун увидеть невооруженным глазом нельзя.

О планетах-гигантах известно намного меньше, чем о планетах группы Земли, что объясняется значительно большим их удалением. Даже ближайшая к нам планета-гигант Юпитер не подходит к Земле ближе чем на 600 000 000 км, что почти в 12 раз больше наименьшего расстояния до Марса. На поверхности Юпитера в лучшие земные телескопы нельзя рассмотреть деталь размером меньше чем 3 000 км в поперечнике. Это означает, что даже на Юпитере деталь размером с Луну мы сможем отличить от точки только в самом благоприятном случае. Все

это относится и к другим планетам-гигантам, только в большей степени.

При наблюдении в телескоп на диске Юпитера прежде всего бросаются в глаза полосы, параллельные его экватору (см. форзац). Это следы колоссальных ветров, дующих на Юпитере. Сто лет назад в южной экваториальной полосе Юпитера было открыто пятно красного цвета. Оно так и называется Большое Красное Пятно (см. форзац). Совсем недавно (1980 г.) такое же пятно было обнаружено и на Сатурне. Оно несколько меньше по размеру, менее контрастно и с Земли не видно. Снимки, полученные на АМС «Пионер-11» и «Вояджер», показали, что эти образования являются гигантскими

атмосферными вихрями. Такой вихрь (рис. 50) в атмосфере Юпитера может существовать тысячи лет (аналогичные ему земные циклоны существуют не более месяца).

Особый интерес вызывает химический состав атмосфер планет-гигантов. Как уже говорилось, Юпитер и другие планеты его группы имеют водородо-гелиевые атмосферы. Содержание метана и аммиака в них по массе примерно  $4 \cdot 10^{-2}\%$  и  $6 \cdot 10^{-2}\%$  соответственно. Однако именно эти два соединения образуют видимый облачный покров.

У Юпитера температура достаточно низка для конденсации кристаллов аммиака. По-видимому, облака светлых зон состоят из смеси кристаллов и капель жидкого аммиака. Но объяснить красно-коричневые полосы поясов, ярко-синие пятна, обнаруженные на снимках АМС, труднее. В настоящее время в атмосфере Юпитера найдены:  $C_2H_6$  (этан),  $C_2H_2$  (ацетилен),  $H_2O$  (вода),  $HCN$  (циан),  $GeH_4$ ,  $PH_4$  (соединения германия и фосфора с водородом, не имеющие специфического названия, возможно, имен-



Рис. 50. Юпитер — крупномасштабное изображение некоторых деталей поверхности планеты.

но они ответственны за цветовые эффекты в атмосферах планет-гигантов).

Химический состав атмосфер других планет-гигантов известен гораздо хуже. По-видимому, в них также преобладают водород и гелий. Аммиак в атмосфере Сатурна в значительной мере, а у остальных планет полностью вымерз, и в их спектрах заметны только сильные полосы метана.

Юпитер обладает магнитным полем в 10—14 раз сильнее земного. В соответствии с этим он имеет мощные радиационные пояса. Электроны, ускоренные в магнитном поле этой планеты, могут достигать Земли.

Большой интерес представляют спутники планет-гигантов. Прежде всего, их очень много — у пяти планет (включая Плу-

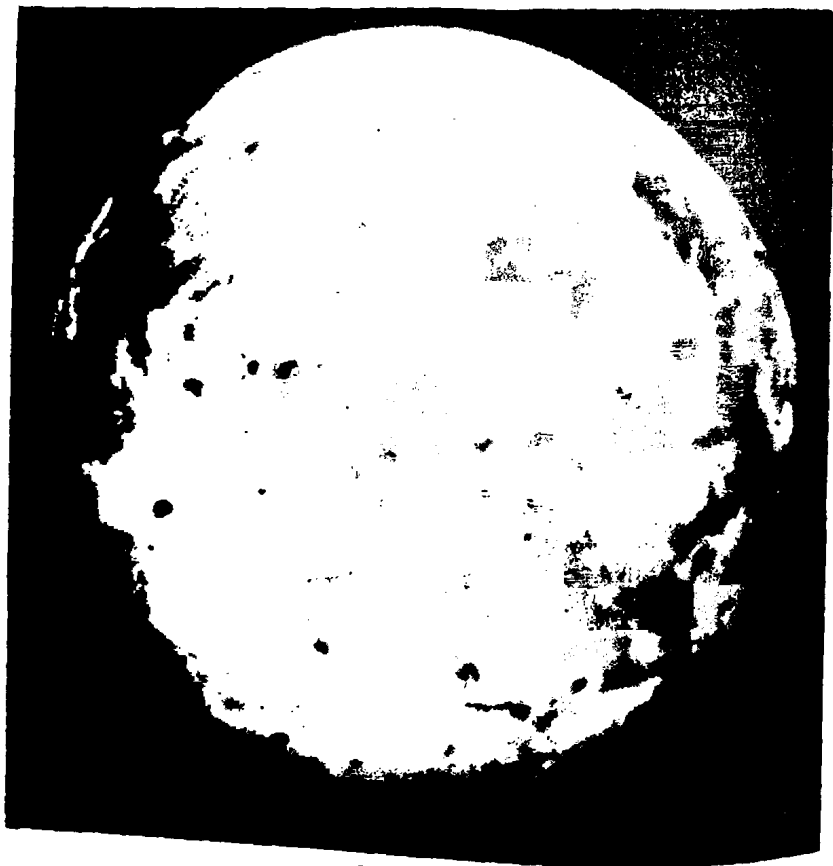


Рис. 51. Ио.

тон) больше 50, причем не исключено, что открыты далеко не все. Самые большие спутники — *Ганимед* (Юпитера) и *Титан* (Сатурна) имеют в диаметре 5262 и 5150 км соответственно, что больше диаметра Меркурия. Кроме того, Титан обладает достаточно плотной азотной атмосферой.

Поверхность многих спутников образована водяным льдом. На всех спутниках видны многочисленные ударные кратеры. Тектонические процессы на спутниках давно угасли. Исключение состав-



Рис. 52. Энцелад.

ляют спутник Юпитера — *Ио* (рис. 51), на котором видны действующие вулканы, и спутник Сатурна — *Энцелад* (рис. 52). На нем в недалеком прошлом действовали, а возможно даже и сейчас действуют вулканы, извергающие потоки воды. Энергия для действующих вулканов поставляется процессами внутреннего трения, вызываемыми движениями вещества спутников под действием приливных сил.

## § 19. АСТЕРОИДЫ И МЕТЕОРИТЫ

1. **Астероиды.** Малые планеты Солнечной системы представляют собой остатки несформировавшейся планеты. По современным представлениям, во время формирования планет в области между орбитами Марса и Юпитера образовалось сравнительно небольшое число не очень крупных (с диаметрами в несколько сот километров) тел, часть из которых в дальнейшем распалась, дав начало современным астероидам.

Самые большие астероиды достигают в диаметре нескольких сотен километров (диаметр *Цереры* около 1000 км, *Паллады* — 608 км, *Весты* — 538 км, рис. 53). Тела меньше одного километра уже не считаются астероидами, их принято называть метеорными телами.

Массы малых планет меняются от  $1,3 \cdot 10^{21}$  (Церера) до

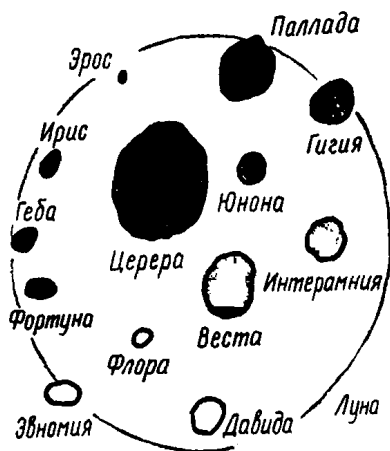


Рис. 53. Сравнительные размеры крупнейших астероидов и Луны.

$10^{13}$  кг. Средняя плотность их лежит в пределах от 2 до 8 по отношению к плотности воды.

Важной характеристикой является отражательная способность астероидов. Подробные исследования, проведенные в 70-х годах нашего столетия, показали, что астероидам присуща разнообразная окраска. Самым темным является астероид *Бамберга*. Он отражает менее 3% падающего света (т. е. в полном смысле этого слова он темнее сажи). Самым светлым астероидом является

*Веста*, которая отражает 28% падающего света.

Астероиды вращаются вокруг своих осей, причем довольно быстро. Периоды вращения большинства астероидов составляют около 5—6 ч. Наблюдения показывают, что их видимая яркость при этом периодически меняется. Расчет этих изменений позволяет определить форму астероидов: для больших, диаметрами в сотни километров, она оказывается близкой к сферической, а для маленьких — неправильной, обломочной.

**2. Метеоры и метеориты.** Метеором называется световое явление, возникающее на высоте 130—180 км над уровнем моря при вторжении в земную атмосферу метеорного тела из межпланетного пространства.

Подавляющее большинство метеорных тел представляют собой пылинки массой в доли грамма. Влетая в земную атмосферу со скоростями в десятки километров в секунду, они тормозятся ею, раскаляются и сгорают в верхних ее слоях. Метеор виден как светящаяся точка, быстро проносящаяся по небу. Иногда это явление называют падающей звездой. Тело несколько большей массы, распыляясь, оставляет за собой шлейф раскаленных газов и дыли. Его можно наблюдать при помощи радиолокаторов или визуально, если он освещается Солнцем. Этот шлейф постепенно размывается воздухом и виден часто в течение нескольких часов. Наблюдения за ним дают ценную информацию о движении воздуха на больших высотах.

Если в земную атмосферу вторгается тело массой до нескольких килограммов, то наблюдается исключительно большой и яркий метеор — болид, представляющий собой летящий по небу огненный шар, часто с хвостом (рис. 54). Нередко пролет болида сопровождается звуковыми явлениями (раскатами грома).



Рис. 54. Падение болида.

Если метеорное тело, образующее болид, имеет достаточно большую массу, то при благоприятном стечении обстоятельств (небольшая скорость вторжения и малый угол входа в атмосферу) оно не успевает полностью испариться в атмосфере и достигает поверхности Земли. Этот остаток метеорного тела называется метеоритом.



Рис. 55. Аризонский метеоритный кратер (диаметр 1200 м, глубина 175 м).

Упавший на Землю метеорит найти довольно сложно, даже если его падение наблюдалось. Несмотря на то что ежедневно на Землю выпадает до 50 т метеорного вещества, общее число найденных метеоритов не превышает 2 000. (В коллекции АН СССР хранятся осколки примерно 160 метеоритов.) Поэтому о каждой находке метеорита следует немедленно сообщать в Москву, в Комитет по метеоритам АН СССР.

Чрезвычайно редко, по-видимому, раз в несколько миллионов лет, Земля сталкивается с большими метеорными телами, имеющими массу в сотни и тысячи тонн. Такое тело практически не теряет скорости в атмосфере Земли и достигает ее поверхности со скоростью больше 10 км/с. При ударе оно проникает в Землю на глубину в 4—5 своих диаметров и там, из-за мгновенного перехода кинетической энергии в теплоту, взрывается, оставляя огромную воронку — метеоритный кратер. Один из таких кратеров (рис. 55) находится в Аризоне (США). Его диаметр

около 1200 м, а глубина 175 м. Возраст кратера около 5000 лет.

На острове Саарема в Эстонской ССР найдена целая группа метеоритных кратеров.

Специальные аэро- и космические фотосъемки позволили обнаружить на Земле 115 гигантских метеоритных кратеров, возраст которых превышает многие миллионы лет. Одним из таких кратеров является Пучеж-Катунская впадина, расположенная около города Горького. Ее диаметр около 65 км.

Большое внимание привлек к себе взрыв, связанный с падением гигантского метеорита на реке Подкаменная Тунгуска 30 июня 1908 г. В настоящее время можно считать твердо установленным, что это было вторжение в земную атмосферу небольшой кометы, которая представляла собой ком рыхлого снега (см. следующий параграф). Взрыв, приведший к полному испарению такого тела, произошел в воздухе, почему и не удалось обнаружить кратер. По этой же причине нет и никаких осколков метеорита.

Изучение химического и минералогического составов метеоритов показало, что они делятся на следующие группы: *каменные, железные и железо-каменные*.

Расчеты показывают, что каменные и железные метеориты образовались при разрушении сравнительно небольших астероидных тел, имевших диаметр около 100—200 км. Образование метеоритов, по-видимому, происходит и в настоящее время.

## § 20. КОМЕТЫ

Своим необычным видом (рис. 56) и внезапным появлением кометы издавна привлекали внимание астрономов. В комете различают голову, в которой часто видно более яркое ядро, и хвост, простирающийся от головы в сторону, противоположную Солнцу. Хвост кометы может достигать огромных размеров, иногда его длина превышает 100 млн. км. На небе такие хвосты проходят через несколько созвездий, их угловые размеры составляют 160—180°.

Головы комет имеют в поперечнике несколько десятков или сотни тысяч километров. В редчайших случаях диаметр головы может достигать миллиона километров и быть по своим размерам сравнимым с Солнцем. Конечно, приведенные величины касаются самых больших комет.

Массы комет не превышают  $10^{18}$ — $10^{19}$  кг, т. е. они меньше чем одна миллионная доля массы Земли. При столь небольших массах и огромных размерах кометы имеют ничтожно малую плотность. В среднем она лишь незначительно превышает плотность межпланетного газа. В 1911 г. Земля прошла через хвост кометы Галлея, но никаких явлений в земной атмосфере, связанных с этим событием, наблюдать не удалось.

Появление комет на небе, как правило, совершенно случайно. Обычно в течение года наблюдается 10—15 комет. Наибольшее их число было в 1977 г.: 10 новых и 15 ранее появлявшихся. Но особенно яркие кометы, хорошо видимые невооруженным глазом и обладающие большими хвостами, наблюдаются редко, всего 5—6 комет в столетие.

На расстоянии, примерно равном расстоянию от Солнца до Юпитера, поверхность кометы разогревается солнечным излучением до температуры испарения замерзших газов ( $-160$ ,  $-170^{\circ}\text{C}$ ). Выделяющиеся газы образуют облако, которое начинает светиться под действием ультрафиолетового излучения Солнца и солнечного ветра. Как правило, именно в это время астрономы обнаруживают комету.

Испарение замерзших газов происходит с поверхности кометы, а пылевые частички, оставаясь, образуют рыхлый слой, который обладает очень малой теплопроводностью и защищает



Рис. 56. Комета Галлея в январе 1986 г.

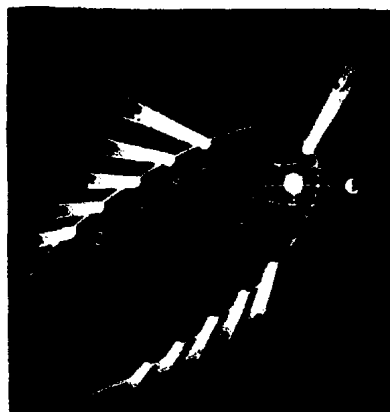


Рис. 57. Изменение кометного хвоста во время движения кометы по орбите.

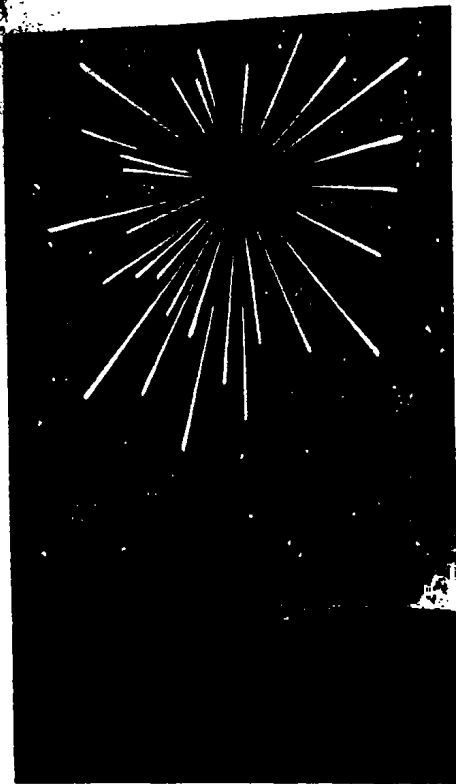


Рис. 58. Радиант метеорного потока.

внутренние части кометы от чрезмерного нагревания. Но по мере приближения к Солнцу выделение газов происходит все более и более бурно; размеры газового облака увеличиваются, оно становится ярче. Кроме того, под действием давления света и солнечного ветра частички кометной «атмосферы» отбрасываются в сторону, противоположную Солнцу, образуя протяженный хвост (рис. 57).

В марте 1986 г. АМС «Вега-1» и «Вега-2» прошли на расстоянии менее 9 000 км от ядра кометы Галлея. На снимках, переданных ими, видно, что ядро кометы представляет собой тело неправильной формы поперечником около

11 км. Поверхность его, по-видимому, покрыта почти сантиметровым слоем пыли. Станции провели анализ химического состава пылинок и газов, окружающих комету, выполнили много других исследований, результаты которых обрабатываются.

Обогнув Солнце, комета уходит на периферию Солнечной системы. В тех случаях, когда возмущения от планет переводят ее на периодическую орбиту, комета, каждый раз приближаясь к Солнцу, постепенно теряет вещество, разрушается и рано или поздно прекращает свое существование. На орбите кометы остается рой мелких метеорных частиц. При встрече с Землей такой рой наблюдается в виде метеорного потока. Так как все метеоры потока движутся по параллельным путям, нам кажется из-за перспективы, что они вылетают из одной точки неба — радианта (рис. 58). Название потока дается по имени созвездия, в котором находится радиант.

Что же представляют собой кометы? Современные данные говорят, что в наиболее отдаленных областях Солнечной системы на расстояниях порядка 100 000 а. е. движется огромное число небольших тел, представляющих собой комки слипшихся пылинок, окутанных водородным, углеводородным и водяным снегом. Совокупность этих частиц получила образное название облака комёт. Образовалось это облако одновременно с Солнечной системой, примерно 5 млрд. лет назад.

Отдельные комки облака движутся с небольшими относительными скоростями (метры или доли метра в секунду) и при столкновениях иногда разрушаются, иногда слипаются. В силу этого большинство из них имеет размеры от десятков метров до десятка километров. Под действием ионизирующего излучения (космические лучи, солнечный ветер, ультрафиолетовое и рентгеновское излучения) в веществе комет происходят химические реакции, в результате чего могут образовываться весьма сложные химические соединения.

Случайное столкновение или возмущение от ближайших звезд может так изменить движение комка, что он будет отброшен во внутренние области Солнечной системы. И если при этом произойдет его сближение с одной из больших планет (Юпитером, Сатурном, Ураном, Нептуном), то орбита сильно изменится, в результате чего комок сможет подойти к Солнцу на близкое расстояние и превратиться в комету.

#### Контрольные вопросы к главе IV

1. Охарактеризуйте строение Солнечной системы (перечислите ее основные элементы и дайте их физическую характеристику).
2. Опишите основные различия между планетами группы Земли и планетами группы Юпитера.
3. Пользуясь таблицей физических характеристик планет, определите вторую космическую скорость для Юпитера, Марса и Меркурия.
4. Каково происхождение кратеров на поверхности планет группы Земли?
5. Опишите строение Юпитера.
6. Опишите явление «падающей звезды». Что такое радиант?
7. Опишите строение кометы.
8. Почему кометный хвост всегда направлен от Солнца?

## Глава V

### МИР ЗВЕЗД

#### § 21. СОЛНЦЕ

1. **Физические характеристики Солнца.** Ближайшая к нам звезда — Солнце (рис. 59) является одновременно и самым ярким объектом на нашем небе. Поток тепла и света, идущий от него, обуславливает саму возможность жизни на нашей планете. Все, что происходит на Солнце, самым непосредственным образом скажется на Земле. Уже этим определяется наш интерес к Солнцу. Но, кроме того, Солнце является единственной звездой, у которой наблюдается видимый диск, это дает возможность изучать на нем такие процессы, которые не могут быть исследованы у других звезд.

Поэтому изучение Солнца помогает нам понять природу других звезд, и наоборот, изучение звезд помогает исследовать Солнце.

Звезды (в том числе и Солнце) представляют собой гигантские газовые (точнее, плазменные) шары. С физической точки зрения они характеризуются тремя величинами: массой  $M$ , радиусом  $R$  и светимостью  $L$ .

*Полная энергия, излучаемая звездой в единицу времени, называется светимостью.*



Рис. 59. Солнце. Общий вид на экране школьного телескопа.

Поскольку Солнце является типичной звездой, то принято выражать массу, радиус и светимость всех других звезд по отношению к тем же параметрам Солнца, которые в системе СИ имеют значения:

$$M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг};$$

$$R_{\odot} = 7 \cdot 10^8 \text{ м};$$

$$L_{\odot} = 4 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$$

( $\odot$  — условное обозначение Солнца).

Солнце представляется нам в виде небольшого диска с угловым диаметром около  $0,5^\circ$ . Его яркость исключительно велика.

Смотреть на Солнце категорически запрещается не только в любой оптический прибор, но даже невооруженным глазом, так как это может привести к мгновенной слепоте. При изучении Солнца его изображение с помощью телескопа проецируется на специальный экран.

**2. Потемнение к краю.** Уже беглый взгляд на изображение Солнца (см. рисунок на форзаце) показывает, что солнечный диск к краю заметно темнее, чем в центре, и имеет резкую границу. Последнее вступает в видимое противоречие с тем, что вещество Солнца находится в газообразном состоянии. Казалось бы, газовый шар не может иметь резкой границы. Объяснение этих на первый взгляд совсем не столь существенных особенностей позволяет глубже понять природу Солнца и звезд.

**3. Тепловое излучение. Закон Стефана — Больцмана.** Все нагретые тела испускают электромагнитное излучение, возникающее в веществе за счет внутренней энергии. Это излучение характеризуется непрерывным спектром и называется тепловым излучением. Его мощность определяется законом Стефана — Больцмана.

Энергия, излучаемая поверхностью нагретого тела, пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры.

Каждый квадратный метр поверхности излучает в 1 с энергию, равную  $E = \sigma T^4$ , где  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Дж/(м<sup>2</sup>·К·с) — постоянная Стефана — Больцмана.

Этот закон действует при термодинамическом равновесии. В частности, если мы выделим в газе внутри звезды какую-нибудь поверхность, то с нее будет излучаться энергия, определяемая этим законом.

**4. Распространение излучения внутри звезды (Солнца).** Свечение верхних слоев звезды обеспечивается потоком энергии, идущим из ее недр. Энергия передается только от более горячих к более холодным телам, следовательно, в недрах звезды температура должна быть более высокой, чем на поверхности, и увеличиваться к центру.

Передача энергии осуществляется либо *конвекцией* (подъемом более горячих масс газа, которые отдают избыточную энергию окружающему более холодному веществу), либо *лучистым пере-*

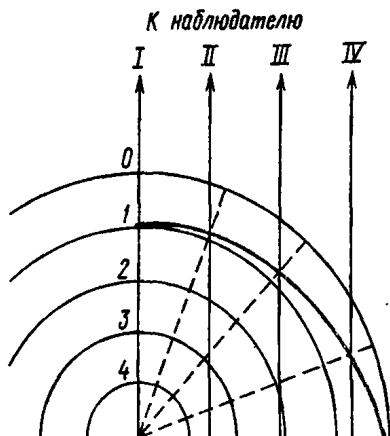


Рис. 60. К объяснению потемнения к краю.

носом, т. е. при помощи излучения. В верхних слоях звезд лучистый перенос играет основную роль.

Распространяясь в веществе, излучение частично им поглощается. Доля поглощенной энергии определяется плотностью, температурой, химическим составом вещества и длиной пути, пройденного излучением.

Выделившаяся в центральных областях энергия\* поглощается окружающим веществом и снова излучается (переизлучается). Это излучение, пройдя некоторое расстояние, будет поглощено уже в других, более высоко расположенных слоях звезды. Оно поднимет температуру поглотившего его вещества и снова будет излучено. Так, поглощаясь и переизлучаясь, энергия медленно просачивается к поверхности звезды.

**5. Формирование наблюдаемого излучения Солнца.** Рассмотрим, как образуется то излучение Солнца, которое приходит к наблюдателю. Для этого мысленно разобьем Солнце концентрическими сферами на ряд слоев. Самую внешнюю сферу проведем так, чтобы вышедшее с ее поверхности излучение уже почти не ослаблялось в вышележащем веществе Солнца. Естественно, таких сфер можно провести сколь угодно много. Но мы выберем такую, чтобы ее радиус был наименьшим. Некоторая неопределенность в выборе подходящей сферы не играет существенной роли, так как ошибка не может превышать 10—20 км. Выбранную таким образом сферу обозначим цифрой 0 (рис. 60) и назовем нулевым уровнем. От этого уровня отсчитывается по направлению к центру звезды глубина слоя. Толщину каждого слоя выберем так, чтобы излучение, распространяющееся вдоль радиуса, проходя этот слой, ослаблялось в 2,7 раза. (Это число выбрано согласно требованиям математического анализа.)

\* Причины и способы выделения энергии в центральных областях звезд будут рассмотрены в § 26.

Рассмотрим излучение, приходящее к нам от центра диска Солнца (оно распространяется вдоль луча I).

Излучение, приходящее от Солнца к наблюдателю, формируется всеми слоями. Однако вклад каждого из них не одинаков. Небольшой вклад в излучение вносят самый поверхностный слой (его температура относительно невысокая и поэтому излучаемая энергия мала) и самые глубокие слои (4 и более глубокие на рис. 60). В глубоких слоях излучается много энергии, так как их температура очень высокая, но большая ее часть поглощается веществом вышележащих слоев.

Как показывают расчеты, подавляющая часть излучения, приходящего к наблюдателю от центра Солнца, формируется на поверхности сферы I, т. е. оно ослабляется на пути к наблюдателю в 2,7 раза (ослабление фактически происходит на пути от сферы I к сфере 0, так как дальше поглощения нет).

*Слой, в котором формируется подавляющая часть излучения, приходящего к наблюдателю, называется фотосферой звезды.*

*Поверхностью фотосферы (соответственно и поверхностью звезды) условно называют уровень, излучение которого, проходя в направлении радиуса, ослабляется за счет поглощения в вышележащих слоях вещества точно в 2,7 раза.*

Температура на этом уровне считается температурой звезды. Для Солнца она равна примерно 6000 К.

Луч I показывает направление распространения излучения, идущего к нам от центра диска, лучи II—IV — от точек, расположенных ближе к краю. Физические условия (плотность и температура вещества) в слое, ограниченном сферами I и 0, меняются мало, поэтому чтобы излучение, распространяющееся вдоль любого из лучей, было ослаблено в этом слое в 2,7 раза, оно должно пройти в нем одинаковые расстояния. Следовательно, поверхность, на которой формируется излучение, приходящее к наблюдателю, расположена на тем меньшей глубине, чем ближе она подходит к видимому краю диска. (На рисунке 60 эта поверхность показана сплошной синей линией.) Поскольку температура вещества падает с уменьшением глубины, то падает и мощность излучения. Это объясняет потемнение к краю.

Толщина слоя, ограниченного поверхностями 0—I, настолько мала по сравнению с радиусом Солнца, что мы не можем его увидеть даже в самые большие телескопы. Это объясняет, почему край Солнца кажется нам резким.

**6. Формирование наблюдаемого спектра Солнца.** Тепловое излучение плазмы имеет непрерывный спектр. Поглощается оно довольно слабо, поэтому мы видим фотосферу на большой глубине, где температура высокая и мощность излучения большая.

Атомарный газ обладает линейчатым спектром, т.е. атомы поглощают и излучают определенные длины волн, характерные для каждого химического элемента. Причем поглощение излучения с этими длинами волн намного сильнее, чем его поглощение в плазме. Поэтому излучение в этих длинах волн формируется на меньшей глубине, где температура и мощность излучения соответственно меньше, чем на уровне фотосферы, наблюдаемой в непрерывном спектре. В результате на фоне яркой радужной полосы непрерывного спектра, сформировавшегося в фотосфере звезды, появляются темные полосы — спектральные линии поглощения в тех местах, куда попадает излучение, поглощаемое атомами.

Поглощение излучения атомами в большой степени определяется температурой вещества. При одной температуре атомы данного элемента могут поглощать излучение, образуя спектральные линии в диапазоне видимого света, при другой — только в диапазоне ультрафиолетового излучения. Поэтому отсутствие спектральных линий данного химического элемента еще не говорит о его отсутствии в составе светящегося вещества, а наличие мощной, широкой линии — о большом количестве атомов этого элемента. Конечно, наличие характерной спектральной линии доказывает присутствие атомов данного элемента.

Спектры звезд отличаются исключительным разнообразием. Так, в видимой части солнечного спектра наблюдается более 20 000 линий, принадлежащих почти 80 элементам, а в спектре горячей звезды (10 000 К) видны только линии, принадлежащие водороду (см. рисунок на заднем форзаце). В спектрах еще более горячих звезд (35 000 К) видны только линии ионизованного гелия. В действительности их химический состав практически одинаков.

Средний химический состав вещества во Вселенной таков: водорода около 70% по массе, гелия около 30%, всех остальных химических элементов в различных объектах от 0 до 4%.

Отличия в химическом составе отдельных небесных тел (планет, некоторых звезд) легко объясняются условиями их формирования или эволюции.

**7. Оболочки Солнца.** Фотосфера излучает настолько много света, что вышележащие слои Солнца не могут наблюдаться. Только во время полных солнечных затмений, когда диск Луны закрывает ослепительно яркую фотосферу, становятся видимыми внешние слои Солнца — хромосфера и корона (см. рисунок на заднем форзаце, где показано строение оболочек Солнца: фотосфера (1) переходит в хромосферу (2), которая постепенно переходит в корону (3)).

Хромосфера — слой, лежащий непосредственно над фотосферой Солнца. Свое название — цветная сфера — она получила за яркий красный цвет. Плотность вещества в хромосфере существенно ниже, чем в фотосфере, поэтому ее излучение имеет линейчатый спектр. Наиболее интенсивными в нем являются линии ионизованного кальция в фиолетовой и линия водорода ( $H_\alpha$ ) в красной областях спектра. Это обуславливает красный цвет хромосферы. Хромосфера простирается примерно до высоты 10 000 км над уровнем фотосферы.

Самые верхние слои Солнца образуют солнечную корону.

Солнечная корона начинается еще в хромосфере и простирается на расстояние в десятки солнечных радиусов. Яркость короны быстро падает и уже на расстоянии двух радиусов Солнца уменьшается в 1000 раз.

В спектре короны наблюдаются яркие линии многократно ионизованных атомов железа, никеля, кальция, алюминия. Это свидетельствует о высокой температуре вещества.

Практически все радио- и рентгеновское излучение Солнца формируется в короне. Радиоизлучение связано со сложными движениями плазмы в магнитном поле короны, а рентгеновское является прямым следствием крайне высокой ( $1,5 \cdot 10^6$ — $2 \cdot 10^6$  К) температуры.

Другие, сходные с Солнцем, звезды также обладают коронами, часто гораздо более плотными и протяженными. Об этом свидетельствует зарегистрированное на ИСЗ рентгеновское излучение близких к нам звезд.

## § 22. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ОБОЛОЧЕК

**1. Грануляция.** Фотосферу, хромосферу и корону называют солнечными оболочками. Все вместе они образуют атмосферу Солнца.



Рис. 61. Участок фотосферы: грануляция и солнечное пятно.

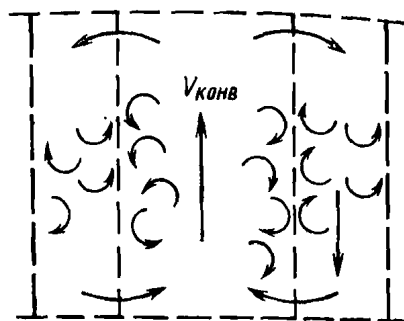


Рис. 62. Схема конвективных движений (синие стрелки — конвективные потоки, черные — турбулентные вихри).

На фотографиях видно, что поверхность Солнца образована совокупностью ярких площадок, разделенных темными промежутками (рис. 61). Эти площадки получили название *г р а н у л*, а явление их образования — *г р а н у л я ц и и*. Средний размер гранул около 700 км, время их жизни около 8 мин. Через 15 мин картина грануляции полностью меняется.

Мощность потока излучения определяется плотностью и температурой вещества. Очевидно, что в каждом слое звезды поток излучения переносит строго определенную энергию. Если же к этому слою подводится энергии больше, то лучистый перенос становится неэффективным и в слое возникает конвекция, сущность которой заключается в том, что вещество слоя перегревается, становится неустойчивым и в нем возникают восходящие и нисходящие конвективные потоки (рис. 62). Более нагретое вещество поднимается, отдавая избыточную энергию окружающим слоям. (Картина аналогична той, которая происходит в кипящем чайнике.) Скорость передачи энергии зависит исключительно от скорости поднимающегося потока. Сам конвективный поток неустойчив, он быстро разрушается в одном месте, чтобы немедленно возникнуть в соседнем. Выход конвективной струи на поверхность приводит к появлению более горячего, а следовательно, и более яркого участка, который и называется *гранулой*.

**2. Солнечные пятна.** Солнце, как и другие небесные тела, вращается вокруг оси. Поэтому на Солнце можно выделить полюса и экватор и построить систему координат, вполне анало-

гично тому, как это делается на Земле. Солнечные координаты также называются широтой и долготой.

Иногда по обе стороны экватора в полосе широтой примерно в  $30^\circ$  (но никогда на нем самом) появляются темные солнечные пятна (рис. 63) и более светлые факелы. Пятна имеют размеры от нескольких тысяч до сотен тысяч километров. Само пятно кажется очень темным, хотя в действительности его яркость всего в 3—5 раз меньше яркости фотосферы, а температура в пятне на 1000—1500 К меньше, чем в фотосфере. В пятне различают тень — темный овал внутри пятна, обычно лишенный деталей, и окружающую ее полутень (хорошо видны на рис. 61 и 63). В последней наблюдаются узкие струи более горячего вещества, растекающиеся к периферии пятна. Точные наблюдения показали, что на уровне хромосферы вещество движется к центру пятна, а на уровне фотосферы вытекает из него. Картина перемещения вещества сильно усложняется его вращательным движением в пятне. По-видимому, можно провести довольно полную аналогию между солнечным пятном и циклоном в земной атмосфере. Пятно — нестабильное образование. От его появления до полного исчезновения проходит от нескольких суток до нескольких (не более 4) месяцев.

Пятна обычно окружены цепочками ярких гранул — фотосферным факелом, который может существовать и без пятна. Это более долгоживущее образование, его иногда удается наблюдать в течение 10—15 месяцев. Факел лежит в более высоких слоях солнечной атмосферы и заметен на краю диска, где яркость фотосферы ниже.



Рис. 63. Группа солнечных пятен.



Рис. 64. Спокойный протуберанец.



Рис. 65. Эруптивный протуберанец.



Рис. 66. Солнечная корона.

3. Хромосфера, протуберанцы. Строение хромосферы более сложное. Это — динамическое образование, т. е. само ее существование объясняется движением вещества в ней. На снимках края Солнца видно, что хромосфера состоит из отдельных ярких струй. В ней наблюдаются протуберанцы. Типичный протуберанец виден как выступ над краем Солнца, простирающийся иногда на сотни тысяч километров. Большинство протуберанцев принадлежат двум обособленным группам: спокойным (рис. 64) и взрывным, или эруптивным (рис. 65). Первые изменяются медленно и наблюдаются, как правило, в течение нескольких дней. Вторые изменяются буквально на глазах. Скорости движения вещества в них достигают сотен километров в секунду, хотя всегда остаются меньше второй космической скорости для Солнца.

4. Солнечная корона. Самые верхние слои атмосферы Солнца, образующие корону (рис. 66), также находятся в состоянии динамического равновесия. На снимках короны легко проследить движения вещества, иногда заметные даже за несколько минут полного солнечного затмения. Типичным для короны является образова-

ние, называемое корональным лучом, хорошо видное на рисунке (см. задний форзац (4)). Это поток вещества, движущийся наружу. Его происхождение рассмотрено в следующем параграфе.

**5. Температура и плотность вещества во внешних слоях Солнца.** Рассмотрим, как меняются плотность и температура вещества в Солнце по мере удаления от его центра.

Плотность солнечного вещества все время уменьшается. Как показывают расчеты, в самом центре она очень велика и достигает  $1,5 \cdot 10^5$  кг/м<sup>3</sup>, а в фотосфере падает примерно до 0,1 г/м<sup>3</sup> (или  $3 \cdot 10^{23}$  атомов в 1 м<sup>3</sup>. Это в 100 раз меньше, чем в воздухе на уровне моря). По мере подъема в хромосфере плотность продолжает уменьшаться, и в верхних ее слоях оказывается примерно в  $10^5$  раз меньше, чем в фотосфере. Наконец, в короне она уменьшается еще в 1000 раз, а на расстояниях в несколько радиусов Солнца сравнивается с плотностью межпланетной среды (несколько миллионов атомов в 1 м<sup>3</sup>).

Иначе изменяется температура. От центра до самых верхних слоев фотосферы она понижается и на границе с хромосферой достигает минимума (4500 К). Затем по мере подъема в хромосфере и короне температура повышается до 10 000 К в верхних слоях хромосферы и до 2 000 000 К в короне. Для объяснения такого хода температуры необходимо рассмотреть, чем определяется температура вещества в данной точке звезды.

Вещество звезды представляет собой идеальный газ (несмотря на высокую плотность даже в центральных областях, оно подчиняется уравнению Менделеева — Клапейрона), поэтому температура является мерой его внутренней энергии и определяется балансом притока и оттока энергии.

В фотосфере приток энергии равен поглощаемой энергии излучения. В короне и хромосфере, где плотность мала, излучение практически не поглощается. Приток энергии в эти области осуществляется звуковыми волнами, которые генерируются конвективными потоками.

Отток энергии осуществляется излучением. Но в хромосфере и короне нет термодинамического равновесия, и закон Стефана — Больцмана там неприменим. Здесь излучают отдельные атомы и только ту энергию, которую они получают при столкновениях с электронами. Энергия, излучаемая атомом в единичном акте столкновения с электроном, всегда одна и та же, поэтому общая излучаемая энергия пропорциональна числу столкновений, а оно,

в свою очередь, пропорционально квадрату числа частиц в единице объема, или квадрату плотности (а она, как известно, здесь ничтожно мала). От температуры мощность излучения зависит мало, и эта зависимость носит очень сложный характер. Возможны случаи, когда мощность излучения с увеличением температуры уменьшается.

**6. Солнечный ветер.** Как оказалось, излучение не может полностью унести всю привносимую звуковыми волнами энергию, поэтому температура и давление газа в короне увеличиваются и газ начинает расширяться в пространство, унося избыточную энергию в виде кинетической энергии движущихся частиц. Устанавливается постоянный поток вещества, скорость которого возрастает по мере удаления от Солнца. Наконец вещество, разогнавшись до второй космической скорости, покидает Солнце.

*Солнечным ветром называется постоянное истечение плазмы солнечной короны в межпланетное пространство, воспринимаемое как непрерывный поток разреженной плазмы, движущийся от Солнца.*

Солнечный ветер уносит каждую секунду  $10^{10}$ — $10^{11}$  кг солнечного вещества, что означает потерю в год до  $1 \cdot 10^{-11}$  массы Солнца.

Аналогичный поток плазмы существует и у звезд (звездный ветер). У тех из них, температура которых намного превышает температуру Солнца, звездный ветер может уносить гораздо большую массу вещества. Некоторые звезды теряют таким образом до  $10^{-6} M_{\odot}$  в год.

### § 23. СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ И ЕЕ ЗЕМНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

**1. Активные образования, солнечная активность.** Солнечные пятна, факелы, протуберанцы представляют собой короткоживущие образования. Поэтому они называются активными образованиями, а процесс их возникновения и развития — солнечной активностью. Солнечная активность обязана своим появлением сложному взаимодействию магнитного поля и солнечной плазмы.

**2. Взаимодействие плазмы и магнитного поля.** Плазмой, как известно, называется газ, содержащий свободные электрические заряды — ионы и электроны, числа которых равны, вследствие чего плазма в целом нейтральна. Взаимодействие между частицами

в плазме намного больше, чем в неионизованном газе, но основные уравнения идеального газа могут быть применены и к ней, по крайней мере в тех условиях, которые мы наблюдаем в астрофизических объектах.

Рассмотрим плазму в магнитном поле. Воспользуемся для этого картиной линий магнитной индукции. Напомним, что эти линии проводятся так, что касательные к ним в любой точке совпадают по направлению с вектором магнитной индукции, а число линий, проходящихся на единицу площади поверхности, перпендикулярной им, пропорционально модулю этого вектора.

Выделим в плазме произвольный контур. Наглядным образом такого контура может служить тонкая гибкая трубочка, содержащая внутри плазму. Приведем плазму в движение так, чтобы наш контур деформировался с изменением площади. Тогда число линий магнитной индукции внутри контура изменится, что означает изменение потока магнитной индукции, пронизывающего контур. Но это обязательно приведет к тому, что в контуре возникнет ток, который, по правилу Ленца, будет направлен так, что его магнитное поле скомпенсирует изменение магнитного потока через контур. Таким образом, наше допущение об изменении числа линий, пронизывающих контур, оказывается неверным.

Изменим теперь значение магнитного поля в плазме. Соответственно должен измениться поток магнитной индукции через контур, но это вызовет появление в нем электрического тока, который, взаимодействуя с магнитным полем, заставит контур сжаться или расшириться, восстановив в нем прежнее значение магнитного потока. Таким образом, *магнитный поток через контур в плазме остается постоянным при любом движении плазмы или изменении магнитного поля.*

Этот принцип называется *принципом замороженности магнитного поля.*

Если энергия магнитного поля превышает кинетическую энергию движущейся плазмы, то ее движение определяется магнитным полем. В этом случае плазма движется только вдоль линий магнитной индукции.

Если энергия движущейся плазмы превышает энергию магнитного поля, то определяющим является движение вещества, а магнитное поле будет возрастать или убывать в зависимости от

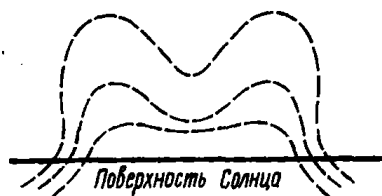


Рис. 67. Магнитное поле в активной области.

(Линии индукции образуют углубление, служащее ловушкой для плазмы.)

особенностей его движений. Так, при быстром сжатии звезды магнитная индукция поля может возрасти на много порядков.

**3. Развитие активной области на Солнце.** Как правило, активные образования появляются в активных областях. Их характерные размеры составляют примерно 100 000 км,

т. е. активная область занимает около 1% поверхности Солнца. В этой области наблюдается магнитное поле очень сложной структуры. Взаимодействие локальных полей и локальных движений плазмы может приводить к увеличению магнитной индукции поля в данном месте. Пока индукция поля невелика, оно может усиливать конвекцию. Дело в том, что движение конвективного потока сопровождается небольшими вихрями (см. рис. 62), которые, «зацепляя» соседние потоки, усиливают трение. Слабое магнитное поле затрудняет появление вихрей, т. е. облегчает движение самого конвективного потока. При этом поток энергии, переносимый конвекцией, увеличивается.

Характерная картина линий магнитной индукции над активной областью на краю диска показана на рисунке 67. Линии магнитной индукции образуют как бы углубление, в котором скапливается холодный и плотный газ. Но чем плотнее газ, тем сильнее его излучение. Поэтому на фоне диска Солнца мы видим эту область как факел, а на краю диска как спокойный протуберанец.

В том случае, если произойдет перестройка магнитного поля, плазма, получив ускорение, начнет выбрасываться в корону, т. е. будет наблюдаться эруптивный протуберанец.

При увеличении индукции магнитного поля картина меняется. Конвекция в областях, где индукция достигает определенных значений, затрудняется и даже может затухнуть. Поток энергии в этом месте ослабевает, температура падает, и возникает солнечное пятно.

Магнитные поля в плазме Солнца перестраиваются очень медленно (даже в эруптивных протуберанцах). Но иногда в хромосфере сближаются области, в которых векторы магнитной ин-

дукции направлены в противоположные стороны. При столкновении таких полей они могут аннигилировать. Их энергия переходит во внутреннюю энергию вещества, резко повышая его температуру, и частично в энергию ускоренных почти до скорости света заряженных частиц.



Рис. 68. Вспышка.

Такое явление характерно взрывным увеличением яркости очень небольшого участка солнечной поверхности и называется хромосферной вспышкой (рис. 68).

Во время вспышки резко усиливается ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца, появляется огромное количество солнечных космических лучей, выбрасываются потоки плазмы, которые достигают Земли и, взаимодействуя с ее магнитным полем, ионосферой и верхней атмосферой, вызывают магнитные бури, полярные сияния и другие аналогичные явления (рис. 69).

Такова, естественно, сильно упрощенная схема явлений, объясняемых взаимодействием солнечной плазмы с магнитным полем.

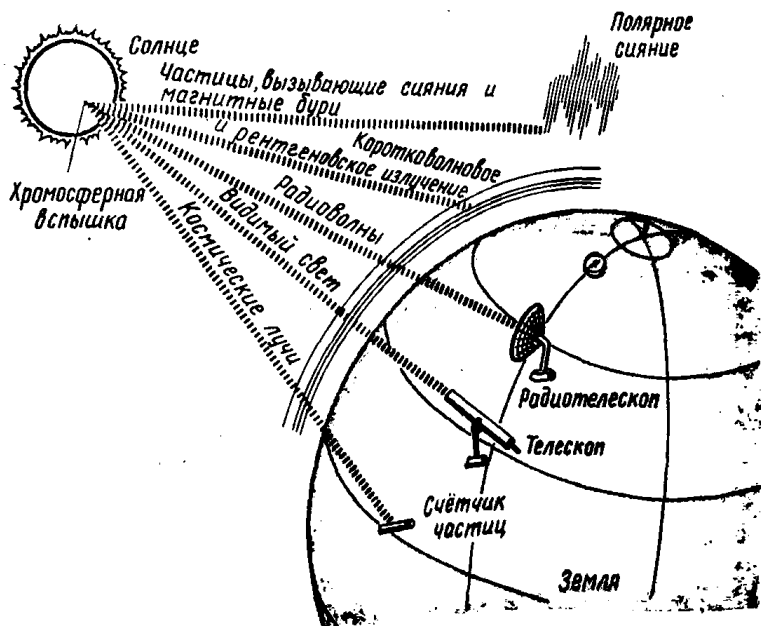


Рис. 69. Воздействие хромосферной вспышки на Землю.

**4. Цикличность солнечной активности.** Солнечную активность принято характеризовать величиной, называемой числом Вольфа:

$$W = 10g + \psi,$$

где  $\psi$  — число солнечных пятен и  $g$  — число групп, в которые они объединены. Наблюдения показывают, что число пятен циклически меняется со временем. Считается, что параллельно с изменением числа Вольфа изменяется частота и некоторых явлений на Земле: число магнитных бурь, погодные условия, ширина годовых колец в деревьях и т. д. Механизм этой связи солнечной активности и земных явлений еще недостаточно хорошо понят.

## § 24. ЗВЕЗДЫ

**1. Светимость звезд.** Звезды представляются нам светящимися точками. Одни из них видны лучше — они ярче, другие слабее, третьи едва различаются невооруженным глазом, четвертые (их подавляющее большинство) видны только в телескоп.

Единственной физической величиной, которая характеризует звезду и может быть нами измерена, является освещенность, создаваемая ею на поверхности Земли. Из оптики известно, что освещенность  $E$ , светимость звезды  $L$  и расстояние до нее  $r$  связаны соотношением

$$E = \frac{L}{4\pi r^2}.$$

Освещенность, создаваемая самой яркой звездой (Сириусом), в  $10^{10}$  раз больше той, которую создает самая слабая звезда, регистрируемая лишь при помощи самых больших телескопов.

Зная расстояние до звезды и измерив освещенность, создаваемую ею, можно определить светимость звезды. Оказалось, что светимости звезд лежат в весьма широких пределах. Большинство звезд имеет светимость меньше солнечной, самые маломощные — примерно в миллион раз меньшую. Самые большие и горячие звезды, называемые белыми сверхгигантами, имеют светимость в десятки тысяч раз больше солнечной.

**2. Температура и цвет звезд.** У самых ярких звезд мы можем различить цвет, который у различных звезд бывает от голубовато-белого до оранжево-красного. Повседневный опыт говорит нам, что цвет зависит от температуры излучающего тела. Эта зависимость лежит в основе почти всех методов определения температуры звезд.

Наиболее точно определяется температура, если удается получить спектр звезды. Распределение энергии в нем (т. е. соотношение энергий излучения в различных диапазонах длин волн) зависит от температуры вещества. И для ее определения в этом случае можно воспользоваться **законом Вина**, утверждающим, что **длина волны, на которую приходится максимальная энергия в спектре излучения, обратно пропорциональна абсолютной температуре излучающего тела:**

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T},$$

где  $\lambda_{\max}$  — указанная длина волны, а  $b$  — постоянная Вина, равная  $0,0029 \text{ м} \cdot \text{К}$ .

Более грубо можно определить температуру звезды, сравнивая энергию, приходящую от нее, в различных диапазонах длин волн.

Определение температуры различных звезд показало, что она может лежать в довольно больших пределах. Самые горячие звезды имеют температуру до  $35\,000 \text{ К}^*$ . При такой температуре максимум излучения лежит в ультрафиолетовой области спектра, и мы воспринимаем цвет звезды как бело-голубой. Принято считать, что белый цвет излучения соответствует температуре  $10\,000 \text{ К}$ . Поверхностная температура самых холодных звезд  $3000\text{—}3500 \text{ К}$ . Эти звезды воспринимаются нами как красные. Возможно, существуют и более холодные звезды, но от них приходит настолько мало света, что мы не в состоянии их обнаружить. Косвенные данные говорят о том, что таких звезд должно быть немного.

**3. Радиусы звезд.** Энергия, излучаемая с единицы поверхности, определяется законом Стефана — Больцмана. Поверхность звезды равна  $4\pi R_*^2$  ( $R_*$  — радиус звезды). Поэтому полная энергия, излучаемая звездой, определяется выражением

$$L = 4\pi\sigma T_*^4 R_*^2.$$

Таким образом, если нам известны температура и светимость звезды, то мы можем вычислить ее радиус.

Угловые размеры дисков звезд во много раз меньше разрешающей способности телескопов (см. § 1.6). Тем не менее, при-

---

\* Встречаются звезды и с более высокой температурой: например, ядра планетарных туманностей ( $T=10^5 \text{ К}$ ) и нейтронные звезды ( $T=10^6 \text{ К}$ ), но это очень кратковременные стадии жизни звезд.

меня самые совершенные приборы и новейшие способы наблюдений, астрономы смогли измерить у нескольких десятков самых больших и близких к нам звезд угловые размеры и, зная расстояния до них, вычислить радиусы. Их значения оказались близкими к вычисленным по формуле светимости.

По своим размерам звезды чрезвычайно разнообразны. Так, нейтронные звезды (обладающие предельно большими плотностями) имеют радиусы 10—12 км, белые карлики сравнимы по своим размерам с Землей, их радиусы около  $0,01 R_{\odot}$ . Радиусы нормальных звезд составляют от 0,1 до  $10 R_{\odot}$ . Сравнительно небольшое число звезд имеют радиусы до  $100 R_{\odot}$ , их называют гигантами; наконец, встречаются и сверхгиганты, их радиусы достигают  $3000 R_{\odot}$ .

**4. Массы звезд.** Определение масс звезд сталкивается со значительными трудностями. Масса звезды может быть определена только в том случае, если звезда входит в двойную систему, у которой известны параметры орбиты — большая полуось и период обращения. К такой системе можно применить третий закон Кеплера (см. § 8.1) и вычислить сумму масс входящих в нее звезд. Если известны параметры движения звезд системы относительно их общего центра масс, то удастся определить массы обеих звезд по отдельности. Так удалось определить массу у нескольких сотен звезд. У остальных массы либо оцениваются по эмпирическим соотношениям, либо вычисляются теоретически.

Массы звезд лежат в довольно узких пределах. Считается, что объекты с массами меньшими  $0,02 M_{\odot}$  уже не являются звездами. Они лишены внутренних источников энергии и их светимость близка к нулю. Обычно эти объекты относят к планетам. Наибольшие непосредственно измеренные массы не превышают  $60 M_{\odot}$ . Теория утверждает, что звезды с массами более  $100 M_{\odot}$  вообще не могут существовать. Еще на стадии образования они должны распасться на несколько тел меньшей массы.

**5. Взаимосвязи характеристик звезд. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела.** Для понимания природы звезд важно выявить зависимости между их отдельными характеристиками. Такие связи находятся путем сопоставления соответствующих величин. Так, в начале XX в. датский астроном Э. Герцшпрунг и американский астрофизик Г. Рессел установили одну из таких зависимостей и представили ее в виде диаграммы, носящей теперь их имена.

На горизонтальной оси диаграммы Герцшпрунга — Рессела (диаграммы Г—Р) откладывают температуру звезды, а на вертикальной — ее светимость в солнечных единицах (рис. 70). Каждой звезде, находящейся в пространстве, на диаграмме отвечает вполне определенная точка. В дальнейшем мы будем говорить для краткости, что место на диаграмме занимает звезда, а не соответствующая ей точка, и при обсуждении эволюции звезд писать: «звезда движется на диаграмме», подразумевая при этом, что в процессе эволюции из-за изменения значений температуры и светимости звезды соответствующая ей точка на диаграмме Г—Р меняет свое положение.

Если бы между светимостями звезд и их температурами не было никакой зависимости, то звезды располагались бы на диаграмме Г—Р беспорядочно. Однако большинство звезд располагается на диаграмме Г—Р в довольно узкой полосе, идущей от левого верхнего угла (звезды большой светимости и высокой температуры) к правому нижнему (звезды малой светимости и низкой температуры). Эта полоса называется главной последовательностью, а звезды, принадлежащие ей, — звездами главной последовательности, или нормальными звездами.

Главная последовательность в месте, отмеченном чертой (см. рис. 70), делится на две части, соответственно верхнюю и нижнюю. Звезды нижней части главной последовательности обычно называют желтыми или красными карликами (в зависимости от их температуры). Солнце принадлежит к типичным желтым карликам.

В области температур ниже 6000 К и выше главной последо-

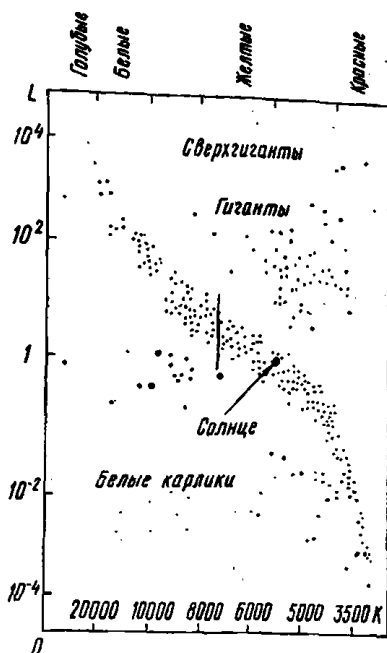


Рис. 70. Диаграмма Герцшпрунга — Рессела — диаграмма «температура — светимость».

вательности расположена группа звезд, образующая ветвь гигантов. Эти звезды обладают сравнительно высокой светимостью. Применяв к ним формулу, связывающую светимость, температуру и радиус звезды, мы увидим, что они обладают большими радиусами ( $10\text{--}100 R_{\odot}$ ); их называют красными гигантами.

Еще большими светимостями и радиусами характеризуются красные сверхгиганты, расположенные на диаграмме Г—Р выше ветви гигантов (см. рис. 70).

В левом нижнем углу диаграммы находятся белые карлики — звезды с высокой температурой и малой светимостью.

Спектры звезд, обладающих одинаковой температурой, но принадлежащих к различным группам, отличаются шириной спектральных линий и некоторыми другими особенностями (например, в спектре сверхгиганта могут одновременно наблюдаться линии металла и его иона, а в спектре карлика линий иона нет). Это дает возможность по виду спектра отнести звезду к той или иной группе на диаграмме Г—Р, а тем самым определить ее светимость по известной температуре. Зная же светимость и освещенность, создаваемую звездой (последнюю величину всегда можно измерить), мы сможем определить расстояние до звезды (см. формулу в § 24.1). Этот метод называется методом спектральных параллаксов, он применим к звездам, находящимся на сколь угодно больших расстояниях.

**6. Соотношение «масса — светимость».** Итак, сопоставление всего двух характеристик звезд позволило выделить несколько обособленных групп. Однако такое выделение еще не дает нам оснований говорить о физической общности звезд, входящих в каждую из этих групп.

Дальнейший анализ показывает, что для звезд главной последовательности существуют два независимых соотношения — между массой и светимостью и между массой и радиусом звезды. Если выразить их в солнечных единицах, то соотношения эти могут быть записаны в виде:

$$L \sim M^{3.9}; R \sim M^{0.6}.$$

Первое соотношение — «масса — светимость» (рис. 71) позволяет оценить массы звезд, не входящих в двойные системы. Для этого необходимо сначала, определив светимость и температуру звезды, доказать ее принадлежность к главной последователь-

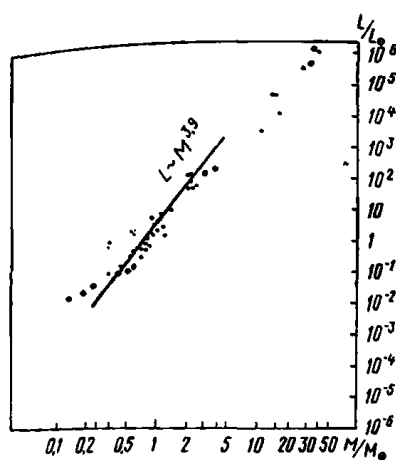


Рис. 71. Диаграмма «масса — светимость».

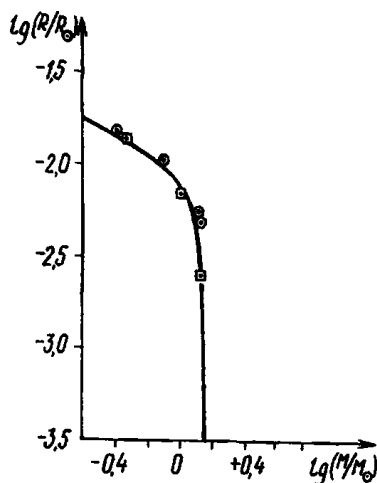


Рис. 72. Диаграмма «масса — радиус» для белых карликов.

ности, после чего, воспользовавшись приведенными соотношениями, найти массу звезды.

Для звезд-гигантов также существуют соотношения «масса — светимость» и «масса — радиус», но с другими показателями степеней.

Для белых карликов зависимости «масса — светимость» вообще нет, а зависимость «масса — радиус» имеет совершенно иной характер. Ее нельзя выразить алгебраической формулой. Графически она представлена на рисунке 72, причем сплошная синяя линия соответствует теоретически вычисленной кривой, а кружки и квадратики — данным для реальных объектов.

Из диаграммы хорошо видно, что по мере увеличения массы радиус белого карлика уменьшается (увеличивающиеся силы тяготения сильнее сжимают вещество звезды) и средняя плотность увеличивается. При массе, примерно равной  $1,45 M_{\odot}$ , радиус белого карлика становится равным нулю. Конечно, такого положения быть не может, это указание на то, что звезд — белых карликов с такими и большими массами просто не существует.

Различие соотношений «масса — светимость» и «масса — радиус» говорит о том, что физическое состояние вещества в звездах различных групп различно.

## § 25. ПЕРЕМЕННЫЕ ЗВЕЗДЫ

**1. Кривые блеска.** Большинство звезд, как и Солнце, несмотря на то что на их поверхности происходят активные процессы, сохраняют свои основные характеристики — размер, температуру, светимость — постоянными.

Но есть звезды, параметры которых, главным образом светимость, претерпевают заметные и легко обнаруживаемые изменения.

*Звезды, меняющие свою светимость на протяжении небольших промежутков времени, называются переменными.*

По причинам переменности звезды делятся на затменно-переменные и на физические переменные, а в зависимости от характера переменности — на периодические, неправильные и взрывные.

Наиболее полно характеризует переменную звезду ее кривая блеска. Это график, на одной из осей которого отложено время, а на другой — логарифм отношения светимости к ее среднему или максимальному значению. Одинаковые по природе переменные звезды обладают одинаковыми кривыми блеска. Их изучение позволяет, во многих случаях, определить причины переменности, т. е. понять природу и причины изменения светимости звезды.

**2. Эффект Доплера.** В исследовании переменных звезд большую роль играет эффект Доплера. Он заключается в следующем. Пусть неподвижный источник излучает свет, длина волны которого  $\lambda_0$ . Тогда движущийся тождественный ему источник излучает свет, длина волны которого равна

$$\lambda = \lambda_0 \left( 1 + \frac{v}{c} \right),$$

где  $v$ , — компонента скорости источника по лучу зрения (см. рис. 22), а  $c$  — скорость света. Скорость положительна, если источник удаляется от наблюдателя, поэтому при удалении источника все линии в спектре смещаются в сторону больших длин волн, т. е. в красную сторону спектра.

Сфотографировав спектр неподвижного источника света, мы всегда получим линии определенной длины волны в определенном месте пластинки. Это дает возможность, сравнив спектр звезды или другого объекта со стандартным спектром неподвижного источника, найти смещение линий, вызванное эффектом Доплера, и

определить лучевую скорость источника света (рис. 73).

**3. Затменно-переменные звезды.** На рисунке 74 представлена кривая блеска Алголя — типичной затменно-переменной звезды. В ее спектре (рис. 75) видны две системы линий, которые периодически смещаются, что говорит о наличии двух звезд,двигающихся относительно общего центра масс. Звезды настолько близки друг к другу, что ни в какой телескоп их невозможно увидеть раздельно. Такая система обычно состоит из двух звезд: звезды главной последовательности большой светимости и ее спутника — красного гиганта с меньшей светимостью. Периодически спутник затмевает главную звезду, что воспринимается нами как уменьшение светимости переменной.

На рисунке 76 показана схема строения и кривая блеска  $\beta$  Лиры. Это тоже двойная звезда, но обе ее компоненты принадлежат к главной последовательности. Звезды очень близки друг к другу, и приливные силы не только деформировали их, превратив в эллипсоиды, но и вызывают истечение из них вещества, которое образует общую газовую оболочку. В этой системе не происходит затмений, так как плоскость их орбиты не проходит через глаз на-

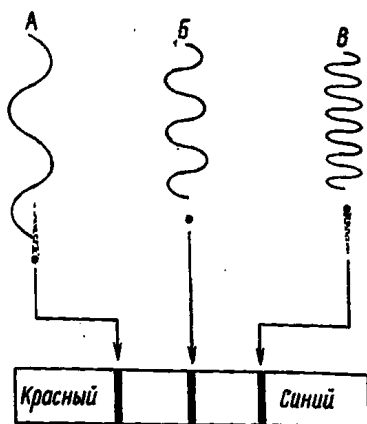


Рис. 73. Эффект Доплера.

(При удалении источника света от наблюдателя (A) линии спектра смещаются в красную сторону, при приближении (B) — в синюю; B — наблюдатель и источник неподвижны относительно друг друга, спектральные линии занимают такое же положение, как и в спектре, полученном в лаборатории.)

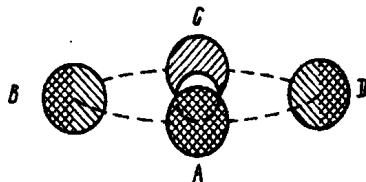
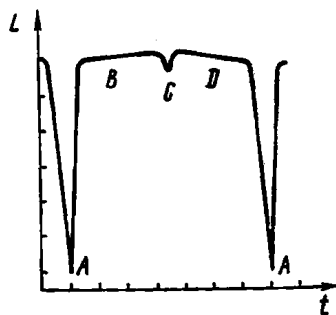


Рис. 74. Схема переменности.

(Взаимное расположение звезд и кривая блеска Алголя.)

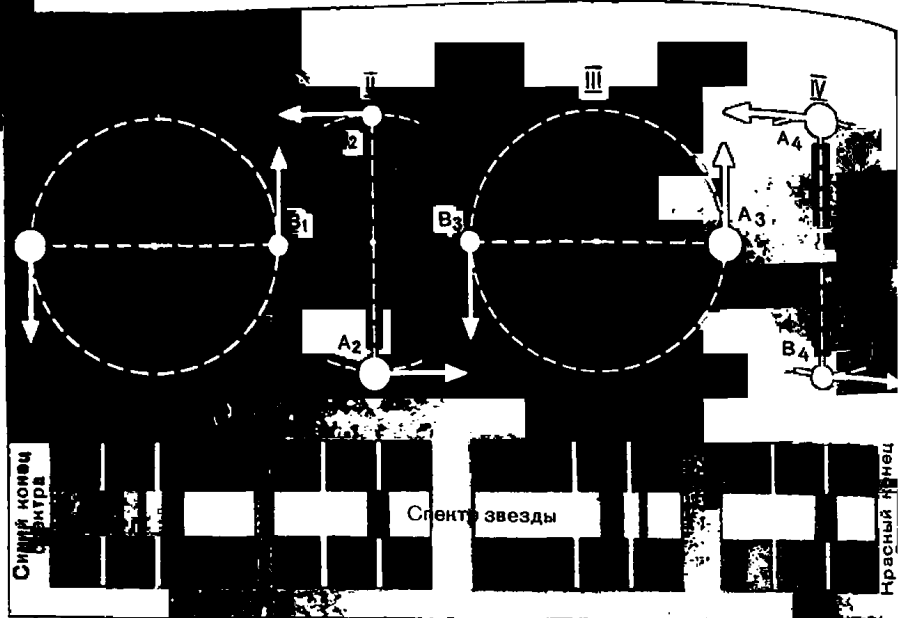


Рис. 75. Изменение спектра затменно-переменной (или тесной двойной). (Линии смещаются в разные стороны из-за эффекта Доплера. I—IV — последовательные конфигурации звезд A и B и соответствующие им спектры.)

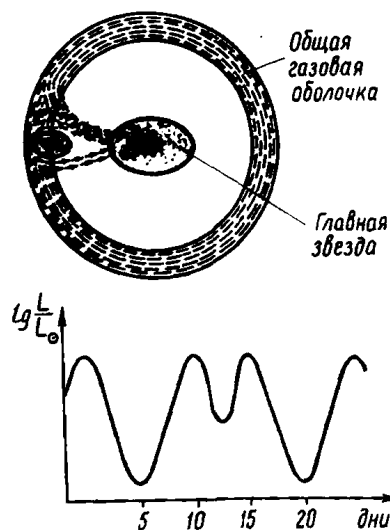


Рис. 76. Схема строения тесной двойной — переменной типа  $\beta$  Лир.

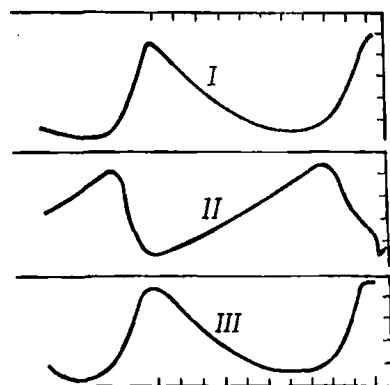


Рис. 77. Кривые переменной типа  $\delta$  Цфея: I — кривая блеска, II — график лучевой скорости, III — график температуры. (Время откладывается в долях периода.)

блюдателя. Кажущееся изменение светимости связано с изменением площади сечений, из-за обращения звезд вокруг общего центра масс. Тем не менее такие системы тоже относят к затменно-переменным звездам.

**4. Физические переменные звезды.** Большинство переменных звезд меняют свою светимость в результате процессов, происходящих в самих звездах. Их называют физическими переменными.

Часть физических переменных меняют свою светимость строго периодически. Наиболее интересными из таких звезд являются переменные типа  $\delta$  Цефея, или цефеиды. Их кривая блеска представлена на рисунке 77. Нарастание светимости происходит быстрее, чем ее спад, изменения строго периодичны. Одновременно со светимостью меняются температура, радиус и лучевая скорость звезды. Все это говорит о том, что в звезде происходят важные изменения.

По современным представлениям, эти звезды пульсируют, сжимаясь и расширяясь под действием сил давления и гравитации. Существующая теория очень сложна, но позволяет понять не только причины изменения основных параметров звезды, но и то, почему цефеидами становятся звезды определенного типа.

Наблюдения показали, что у цефеид существует зависимость периода колебаний от светимости звезды (рис. 78). Определив по наблюдениям период переменности, можно, воспользовавшись указанной зависимостью, найти светимость цефеиды, а следовательно, используя метод спектральных параллаксов, и расстояние до нее.

Цефеиды — звезды-гиганты, обладающие большой светимостью, и видны они на огромных расстояниях. С их помощью определены расстояния до галактик, удаленных от нас на десятки мегапарсек.

Большинство физически переменных звезд относится к полуправильным и неправильным переменным. У них обычно нет четко выраженных периодов (время между максимумами меняется) и значение максимума может меняться.

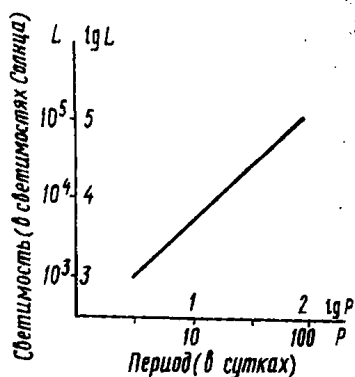


Рис. 78. Диаграмма «период — светимость» для цефеид.

Если у цефеид светимость изменяется не более чем в 2 раза, то светимость неправильных переменных звезд может меняться в десятки раз. Сильно меняются и спектры этих звезд, причем изменения в спектрах далеко не всегда можно объяснить известными нам процессами. Изучение неправильных переменных представляет собой одну из интереснейших задач астрофизики.

**5. Взрывающиеся переменные. Новые и Сверхновые.** Особым типом переменных являются взрывающиеся звезды, светимость которых меняется очень быстро, иногда настолько быстро, что изменения замечаются невооруженным глазом. К взрывающимся переменным относятся, прежде всего, звезды типа UV Кита и Т Тельца. Они характеризуются быстрыми неправильными изменениями светимости, которая иногда в течение нескольких минут увеличивается в 100 раз. При этом происходят изменения в спектре: на фоне обычного спектра поглощения появляются линии излучения, а в ультрафиолетовом диапазоне — непрерывное излучение нетепловой природы. Такие звезды, как правило, встречаются группами в пределах больших газопылевых туманностей. В настоящее время считается, что эти звезды находятся на ранней стадии эволюции (см. § 33).

Среди взрывающихся переменных выделяются еще два типа, внешне очень сходных, но существенно отличных по своей природе. Это Новые и Сверхновые звезды.

Иногда на небе появляются звезды, которые раньше никто не видел. Некоторые из них можно наблюдать невооруженным глазом, по видимой яркости они сравнимы с наиболее яркими звездами. В древности эти звезды называли Новыми, так как считали, что это действительно вспыхивает новая звезда. Только после изобретения фотографии было установлено, что, как правило, на месте новой звезды была видна слабая, не наблюдавшаяся невооруженным глазом и ничем особо не выделявшаяся звезда.

Возрастание светимости у этих звезд происходит катастрофически быстро (рис. 79). Менее чем за сутки она увеличивается в 100—1 000 000 раз (для разных звезд). Достигнув максимума, светимость такой звезды медленно, часто в течение нескольких лет, возвращается к первоначальному значению. За время вспышки излучается энергия, равная  $10^{36}$  Дж. Спектр звезды во время вспышки и после нее показывает, что звезда сначала быстро со скоростью около 1000 км/с расширяется и в момент максиму-

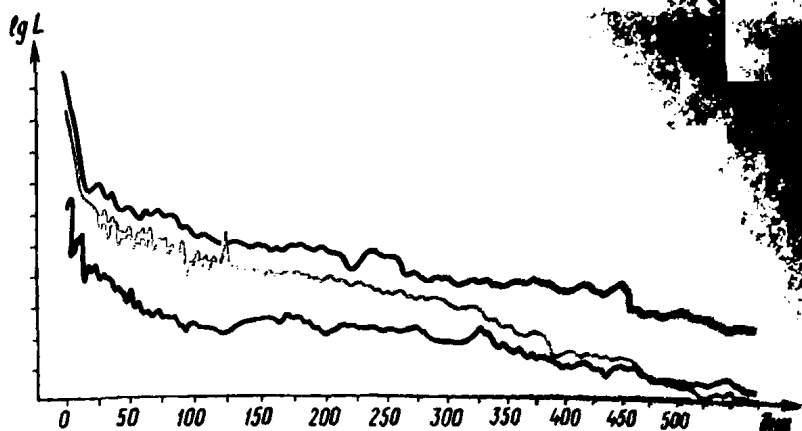


Рис. 79. Кривые блеска типичных Новых

ма сбрасывает оболочку массой около  $10^{-3}$ — $10^{-4}$  М. Через несколько лет у Новых, расположенных сравнительно недалеко от нас, удастся заметить расширяющуюся туманность. Это и есть сброшенная звездой оболочка. По-видимому, взрывы могут повторяться с периодом в несколько тысяч лет.

В нашей звездной системе — Галактике ежегодно вспыхивает 20—30 Новых. Однако большинство вспышек происходят далеко от нас и остаются незамеченными. Фактически наблюдается только одна-две вспышки в год. Яркие Новые, доступные наблюдению невооруженным глазом, появляются примерно раз в 10—20 лет.

Иногда удастся наблюдать еще более мощный взрыв: вспышку Сверхновой. Внешне она подобна вспышке Новой, но скорость расширения составляет уже 6000—8000 км/с, светимость увеличивается в миллиард раз и становится сравнимой со светимостью целой галактики (рис. 80). На месте вспыхнувшей звезды часто возникает огромная туманность (рис. 81); полная энергия, вы-



Рис. 80. Вспышка Сверхновой в далекой галактике (Стрелкой отмечена Сверхновая.)

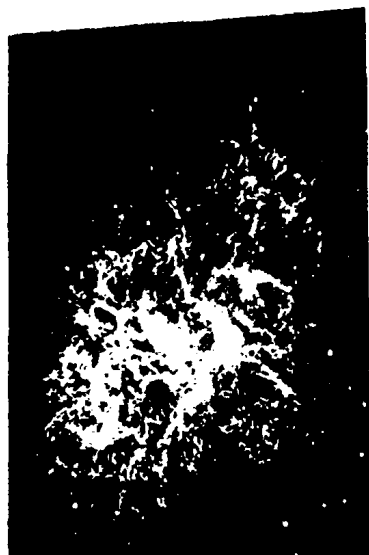


Рис. 81. Крабовидная туманность — остаток взрыва Сверхновой 1054 г.

делившаяся при взрыве, достигает  $10^{42}$ — $10^{44}$  Дж, а возможно, и  $10^{45}$  Дж, что уже сравнимо с полным запасом энергии звезды (см. следующий параграф). Очевидно, что звезда может вспыхнуть как Сверхновая только один раз в своей жизни. Вспышка эта означает полную перестройку звезды и, по-видимому, конец ее существования. Вспышка Сверхновой случается в Галактике не чаще чем один-два раза за столетие.

**6. Пульсары.** На месте вспышки Сверхновой часто наблюдается пульсар. Это переменная звезда, излучение от которой приходит к нам в виде

коротких импульсов, повторяющихся с исключительной правильностью через равные промежутки времени.

Так, один из пульсаров посылает импульсы длительностью около 0,3 с с периодом 1,33730110168 с. Период этот в течение года меняется менее чем на  $10^{-8}$  с.

Импульсы наиболее изученного пульсара (в Крабовидной ту-

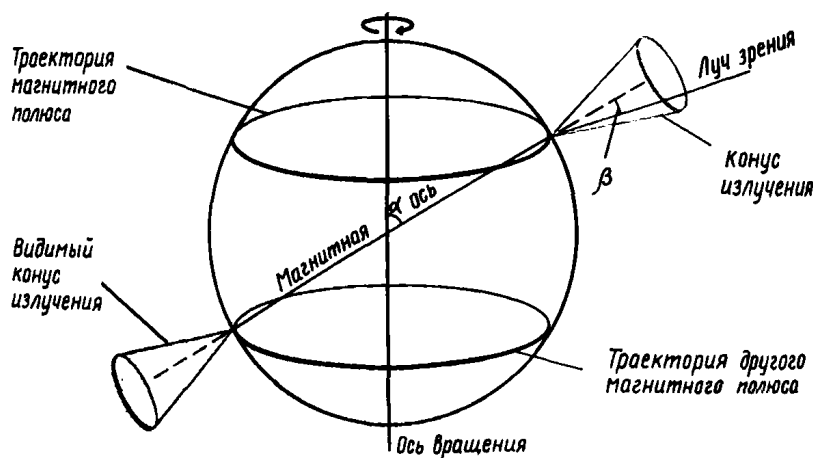


Рис. 82. Схема пульсара.

манности) принимаются в радиодиапазоне, в видимой и рентгеновской областях спектра. При этом наибольшая светимость присуща именно рентгеновскому диапазону.

По современным представлениям пульсар — это сильно намагниченная, быстровращающаяся нейтронная звезда. Магнитная ось и ось вращения наклонены друг к другу. В этом случае возникает излучающая область, посылающая излучение в узком конусе (рис. 82). Вращающийся луч задевает Землю, и мы наблюдаем всплеск излучения.

## § 26. ФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВНУТРИ ЗВЕЗД. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

1. Давление и температура в центре звезды. Для решения вопроса о природе звезд, их строении и эволюции необходимо, прежде всего, определить физические условия в их недрах. Никаких данных наблюдений об этих условиях мы не имеем, так как единственный носитель информации о звездах — их излучение — полностью формируется в самых внешних слоях звезды.

Мы можем утверждать, что звезды (за исключением переменных) — очень стабильные образования. Во всяком случае геологические данные говорят о том, что за последний миллиард лет светимость Солнца менялась не более чем на 5%.

Нам известно, что температура в центральных областях звезд намного выше, чем на поверхности. Это дает нам основание предполагать, что вещество звезды есть плазма, удовлетворяющая уравнению состояния идеального газа. Наконец, можно считать, что звезды находятся в равновесии. Это означает, что в любой точке звезды силы давления уравновешиваются весом вышележащих слоев вещества. Отсюда, в частности, следует вывод, что давление в звезде уменьшается от центра к поверхности.

Рассмотрим небольшой элемент газа, ограниченный двумя слоями радиусами  $r_1$  и  $r_2$  (разность  $\Delta r = r_2 - r_1$  мала по сравнению с  $r_2$ ) и цилиндром с площадью основания  $S$  (рис. 83). На этот цилиндр действует сила, равная разности сил давления на оба основания:

$$F_d = p_2 S - p_1 S = S(p_2 - p_1).$$

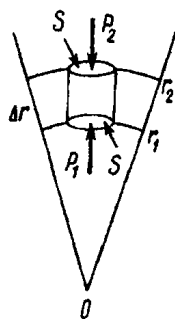


Рис. 83. К объяснению внутреннего строения звезд.

Поскольку  $p_2 < p_1$ , ясно, что эта сила будет направлена наружу. Она уравнивается силой притяжения, которая по закону всемирного тяготения равна

$$F_r = -G \frac{M_r S(r_2 - r_1) \rho}{r^2},$$

где  $M_r$  — масса звезды внутри сферы радиусом  $r$ ,  $\rho$  — плотность вещества в выбранном цилиндре,  $S(r_2 - r_1)$  — объем цилиндра, а знак «—» показывает, что сила тяготения направлена к центру звезды.

Приравняв обе силы, получим:

$$\frac{p_2 - p_1}{r_2 - r_1} = - \frac{GM_r \rho}{r^2}.$$

Чтобы получить представление о том, какие условия могут быть в центре звезды, примем, что  $p_2 = 0$ ,  $r_2 = R_*$  (\* — индекс звезды), что соответствует поверхности звезды, а  $p_1 = p_u$ ,  $r_1 = 0$ , что соответствует ее центру. Тогда  $M_r = M_*$ ,  $r = R_*$ , а для  $\rho$  примем значение средней плотности звезды  $\bar{\rho}$ . Подставив эти величины в последнее уравнение, получим:

$$p_u = \frac{GM_* \bar{\rho}}{R_*}.$$

Вычислив по этой формуле давление в центре Солнца, получим:

$$p_{u\odot} = 2 \cdot 10^{17} \text{ Па}.$$

Для оценки температуры в центре звезды воспользуемся уравнением Менделеева — Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M} RT; \quad p = \frac{R}{M} \frac{m}{V} T = \frac{R}{M} \rho T,$$

где  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $M$  — средняя молярная масса вещества (не путать с  $R_*$  и  $M_*$  — радиусом и массой звезды). Подставив сюда выражения для  $p_u$ , получаем:

$$T_u = \frac{GM}{R} \cdot \frac{M_*}{R_*} \cdot \frac{\bar{\rho}}{\rho_u}.$$

Примем, что средняя плотность звезды равна ее центральной плотности (это даст максимальное значение отношения  $\bar{\rho}/\rho_u$ ) и  $M = 10^{-3}$  кг/моль (что соответствует чистому водороду), тогда получим, что температура в центре звезды равна

$$T_{u\odot} = 2 \cdot 10^7 \text{ К}.$$

Этот результат мало отличается от значения, найденного при точных расчетах (14—16 млн. кельвин).

**2. Запас энергии в звезде.** Оценим запас энергии звезды. Предположим, что звезда во всем объеме имеет одну и ту же температуру, равную температуре в ее центре. Так как законы идеального газа применимы к веществу звезды, то ее внутреннюю энергию можно определить по формуле для внутренней энергии идеального газа:

$$U = \frac{3}{2} \frac{M_*}{M} RT.$$

Принимая полученную выше оценку для температуры в центре звезды (см. с. 116), найдем, что

$$U = \frac{3G}{2} \frac{\bar{\rho}}{\rho} \frac{M_*^2}{R_*}.$$

Ежесекундно звезда излучает энергию, равную ее светимости, поэтому время свечения звезды за счет запаса внутренней энергии

$$\tau = \frac{3G}{2} \frac{\bar{\rho}}{\rho} \frac{M_*^2}{R_* L}.$$

Полагая, по-прежнему,  $\bar{\rho}/\rho = 1$ , получим для Солнца

$$\tau_{\odot} = 10^{15} \text{ с, или } 10^8 \text{ лет,}$$

что существенно меньше времени существования Земли. Таким образом, в звезде должны происходить процессы выделения энергии, или, как принято говорить в астрономии, должны существовать источники энергии.

**3. Гравитационное сжатие.** Один из процессов, который способен поддерживать свечение звезды,— процесс ее сжатия под действием сил всемирного тяготения.

Пусть в звезде упадет температура, в результате этого уменьшится давление и силы тяготения, уже не скомпенсированные силами давления, начнут сжимать звезду. Одна половина работы сил тяготения пойдет на увеличение внутренней энергии, т. е. температуры вещества звезды, вторая — на поддержание ее свечения.

Работа равна изменению потенциальной энергии. Можно показать, что потенциальная энергия звезды равна

$$E_p = -\alpha \frac{GM_*^2}{R_*},$$

где  $\alpha$  — коэффициент, всегда меньший единицы, учитывающий возрастание плотности по направлению к центру звезды. Изме-

ние потенциальной энергии звезды при уменьшении радиуса на  $\Delta R_*$  равно

$$\Delta E_p = \alpha \frac{GM_*^2}{R_*^2} \Delta R_*.$$

Разделив это выражение на время  $\Delta t$ , за которое произошло изменение радиуса, получим в левой части уравнения светимость звезды, а справа в выражение войдет скорость ее сжатия  $v$ :

$$L = \frac{\alpha GM_*^2}{R_*^2} v.$$

Исходя из этого равенства можно сказать, что Солнце для поддержания своего свечения должно сжиматься со скоростью:

$$v = 10^{-4} \text{ м/с, или } 1 \text{ км/год (если принять } \alpha = 1).$$

Другими словами, радиус Солнца уменьшается вдвое за время порядка 700 000 лет. А если еще учесть, что для Солнца коэффициент  $\alpha$  не равен 1, как принято нами, а примерно в 10 раз меньше, то окажется, что Солнце должно сжиматься со столь большой скоростью, что это можно было бы заметить невооруженным глазом за 5—10 тыс. лет. Таким образом, гравитационное сжатие не может обеспечить светимость Солнца в течение сколько-нибудь продолжительного времени. Гравитационное сжатие как источник энергии играет роль только в те периоды эволюции звезды (см. § 33), когда ее размеры изменяются достаточно быстро.

С другой стороны, гравитационное сжатие может долгое время поддерживать свечение звезд, имеющих малую светимость. Так, для белых карликов ( $L = 10^{-4} L_\odot$ ,  $R_* = 10^{-2} R_\odot$ ) скорость сжатия, необходимая для поддержания светимости, в  $10^8$  раз меньше, чем для Солнца, и время уменьшения радиуса вдвое составляет сотни миллиардов лет.

**4. Ядерные реакции — основной источник энергии звезд.** При высоких температурах в центральных областях звезд могут происходить термоядерные реакции. Два атома,двигающиеся с огромной скоростью, могут подойти настолько близко друг к другу, что действие ядерных сил позволяет им слиться в одно ядро более тяжелого атома. При этом выделяется огромная энергия.

В недрах большинства звезд главной последовательности идут реакции слияния ядер атомов водорода в ядра атомов гелия.

При преобразовании одного килограмма водорода в гелий выделяется энергия, равная  $10^{14}$  Дж. Поскольку Солнце излучает в  $1 \text{ с}$   $4 \cdot 10^{26}$  Дж энергии, то в нем каждую секунду должно преобразовываться в гелий около  $10^{12}$  кг водорода. Это огромная величина. Но если предположить, что весь водород Солнца должен превратиться в гелий, то для этого потребуется более 100 млрд. лет. В действительности запаса водорода хватит на 10—15 млрд. лет, так как для термоядерных реакций необходимы высокие температуры и они могут происходить только в самых центральных областях Солнца.

После того как исчерпаются запасы водорода, должны возникнуть условия, при которых начинает «гореть» гелий: температура выше 100 млн. кельвин, плотность более  $10^9 \text{ кг/м}^3$ . В этих условиях три ядра атома гелия при столкновении могут слиться в одно ядро углерода. По мере повышения температуры начинают идти и другие ядерные реакции, в ходе которых возникают атомные ядра все более и более тяжелых элементов, вплоть до железа. При образовании еще более тяжелых ядер энергия уже не выделяется, а поглощается, поэтому термоядерные реакции с железом идти не могут.

## § 27. МОДЕЛИ ЗВЕЗД

**Физические основы расчета моделей звезд.** Важнейшим средством и методом изучения природы звезд является построение их моделей с последующим сравнением с данными наблюдений.

*Таблица чисел, показывающая изменение температуры и плотности в каждой точке внутри звезды в зависимости от изменения расстояния этой точки от центра, называется моделью звезды.*

Для расчета моделей используются уравнения, в математической форме описывающие процессы, происходящие в звезде, и условия равновесия. Это уравнение гидростатического равновесия, рассмотренное в предыдущем параграфе, уравнение состояния, которым обычно является уравнение Менделеева — Клапейрона, но могут использоваться и значительно более сложные зависимости, описывающие состояние газа при очень больших плотностях и температурах (плотность больше чем  $10^9$ — $10^{11} \text{ кг/м}^3$ ), уравнение, описывающее ход ядерных реакций и выделение энергии.

Так как энергия выделяется в центральных областях звезды, а излучается с ее поверхности, то особую роль играют уравнения, описывающие перенос энергии. В различных областях звезды энергия может передаваться либо лучистым переносом, тогда эта область называется лучистой зоной (оболочкой или ядром), либо конвекцией, тогда область называется конвективной зоной (ядром или оболочкой). Наличие, расположение и размеры этих зон определяют размеры и строение звезды.

Система уравнений, описывающая указанные зависимости, решается на мощных ЭВМ. В качестве свободных параметров задаются масса звезды и средний химический состав вещества: содержание водорода, гелия и тяжелых химических элементов. Результатом расчета является модель звезды. С ее помощью вычисляются светимость, радиус и поверхностная температура звезды, построенной по этой модели. Полученные результаты сравниваются с данными реальных звезд и делается заключение о пригодности модели.

Если провести расчеты, задавая различные значения масс, то по полученным данным можно построить диаграмму  $\Gamma$ — $P$  для моделей звезд. Сравнение ее с реальной диаграммой служит методом экспериментальной проверки теории. В настоящее время достигнуто хорошее согласие между вычисленной и реальной диаграммами  $\Gamma$ — $P$ .

Рассмотрим теперь основные характеристики главных типов моделей звезд.

*Полностью конвективная модель.* Это — самая простая модель. Вся звезда представляет собой конвективную зону. Температура в ее центре слишком мала для начала ядерных реакций, и энергия выделяется лишь за счет гравитационного сжатия. Реальный аналог: молодая, только что образовавшаяся звезда.

На диаграмме  $\Gamma$ — $P$  такие звезды располагаются между красными гигантами и главной последовательностью.

*Модель звезды нижней части главной последовательности.* Центральную часть звезды, примерно до 50% радиуса, занимает лучистое ядро, выше расположена конвективная зона. Температура в центре звезды около 15 млн. кельвин. Идут ядерные реакции с участием водорода (протон-протонная реакция. Первым актом цикла ядерных реакций является слияние двух ядер водорода в ядро дейтерия ( ${}^2_1\text{D}$ )). Скорость выделения энергии пропорциональна  $T^4$ . Химический состав вещества меняется вдоль

радиуса, к центру увеличивается относительное содержание гелия.

На диаграмме Г—Р ей соответствуют точки нижней части главной последовательности (Солнце).

*Модель звезды верхней части главной последовательности.* В центре находится конвективное ядро, занимающее около 20% радиуса, температура этой области 15—19 млн. кельвин. Идут реакции превращения водорода в гелий путем углеродно-азотного цикла. (Углерод и азот играют роль катализаторов. Цепочка реакций начинается с того, что ядро углерода ( $^{12}\text{C}$ ) поглощает протон, превращаясь в азот ( $^{13}\text{N}$ ).) Темп выделения энергии пропорционален  $T^{17}$ . Химический состав ядра отличается от химического состава лучистой оболочки большим содержанием гелия.

На диаграмме Г—Р эта модель соответствует массивным горячим звездам главной последовательности.

*Модель белого карлика.* Водород полностью исчерпан, за исключением самых верхних слоев атмосферы. Средняя плотность вещества более  $10^9$  кг/м<sup>3</sup>. Оно не удовлетворяет уравнению состояния идеального газа. Его свойства аналогичны свойствам металлов при комнатной температуре. Температура во внутренних частях звезды постоянна и равна 100 млн. кельвин. Плотность от центра к поверхности меняется от  $10^{11}$  до  $10^5$  кг/м<sup>3</sup>. Ядерные реакции не идут, источником энергии является гравитационное сжатие.

*Модель нейтронной звезды.* Плотность вещества достигает ядерной или близка к ней ( $10^{16}$ — $10^{18}$  кг/м<sup>3</sup>). Вещество состоит из нейтронов с небольшой (менее 1%) примесью протонов и электронов. Характерно сверхсильное магнитное поле, у которого магнитная индукция в  $10^{12}$ — $10^{14}$  раз больше, чем у магнитного поля Земли. Соответствующие реальные объекты — пульсар, рентгеновские источники.

*Модель красного гиганта.* Самая сложная модель, имеющая в зависимости от массы несколько вариантов строения самых центральных областей.

При малой массе в центре образуется белый карлик, а верхние слои представляют собой чрезвычайно разреженную, протяженную конвективную зону. Между ними расположен энергояделяющий слой, в котором горит водород.

При больших массах белый карлик образоваться не может, поэтому в ядре температура поднимается настолько, что могут идти реакции с участием гелия и более тяжелых элементов.

Внутри звезды образуется несколько конвективных и лучистых зон и несколько энергосыделяющих слоев, в которых в зависимости от температуры и расстояния от центра идут реакции различных типов. Почти вся масса сосредоточена в сфере радиусом менее чем 0,01% радиуса звезды. Весь остальной объем занят протяженной и разреженной конвективной оболочкой. Температура в центре достигает миллиардов кельвин.

#### Контрольные задачи к главе V

1. Пользуясь законом Стефана — Больцмана, определите температуру солнечного пятна, если энергия, излучаемая единицей его поверхности, в 16 раз меньше, чем та же величина для фотосферы.
2. Сравните условия видимости факела на краю диска Солнца и в его центре при следующих условиях: энергия, излучаемая единицей поверхности у края диска, на 40% меньше, чем в центре, а температура факела на 5% выше температуры фотосферы. (Условия видимости определяются отношением энергий, излучаемых деталью и фоном.)
3. Звезда имеет светимость  $100 L_{\odot}$  и массу  $M_{\odot}$ . Оцените время существования звезды, если в ней может выгореть 20% всего имеющегося водорода.
4. Поверхностные температуры трех звезд равны соответственно 4500, 6000, 10 000 К. Определите отношение их светимостей, если отношение радиусов 100:1:0,005.
5. Цефеида, имеющая период 10 дней, создает на поверхности Земли освещенность в 100 раз меньшую, чем звезда  $\alpha$  Центавра. Оцените расстояние до цефеиды.
6. Параллакс двойной звезды равен 0,02", большая полуось видна под углом 1", период обращения — 144 года. Оцените массы звезд, если они отстоят от центра масс на расстояниях, относящихся как 1:5.
7. Определите период обращения двойной звезды, если ее компоненты имеют массы в 1 и 3 массы Солнца и расположены на расстоянии 5 а. е. (орбиту считать круговой).
8. Светимости двух звезд относятся как 10 000:1. Как относятся их массы?

## Глава VI

### МИР ГАЛАКТИК

#### § 28. НАША ГАЛАКТИКА

1. **Форма и размеры Галактики.** В ясную безлунную ночь наше внимание привлекает туманная слабосветящаяся полоса, пересекающая все небо (рис. 84), — Млечный Путь. Внимательный наблюдатель отметит, прежде всего, его клочковатую структуру и неодинаковую в разных местах яркость. Уже в глубокой древности было высказано предположение, что Млечный Путь представляет собой совокупность огромного числа слабых звезд. Но только после применения телескопа удалось доказать, что эта гипотеза верна и что Млечный Путь и другие видимые звезды составляют звездную систему — Галактику (от греческого названия Млечного Пути — *galaktikos*, т. е. молочный; принято писать с большой буквы).

Еще в XVIII в. В. Гершель предложил метод исследования структуры Галактики, который, правда, значительно уточненный, но не изменившийся по идее, применяется и в настоящее время. Он заключается в подсчете звезд, обладающих определенной кажущейся яркостью и видимых в заданном направлении. Переходя последовательно ко все более и более слабым звездам, мы будем подсчитывать число звезд на все больших и больших рас-



Рис. 84. Участок Млечного Пути.

стояниях. Сопоставляя подсчеты, сделанные в различных направлениях, можно получить представления о форме, размерах и строении нашей звездной системы. (Гершель не знал о разной светимости звезд и считал, что она у всех звезд одинакова. Но так как большинство звезд по своей светимости близки к Солнцу, то его результаты не очень сильно отличаются от современных, в которых различие в светимостях учитывается точно.)

Наша Галактика — гигантская звездная система. Ее диаметр равен примерно 30 кпк (30 000 пк), а общая масса составляет около  $10^{41}$  кг, или  $10^{11}$  масс Солнца. В Галактику входит более 150 млрд. звезд, кроме того — межзвездные пыль и газ, общая масса которых составляет примерно 5% от массы звезд.

Большая часть звезд Галактики сосредоточена в объеме, напоминающем по форме линзу, диаметр которой равен диаметру Галактики, а толщина не превышает 4 кпк (рис. 85). Звезды, находящиеся в этом объеме, называются звездами диска, или звездами плоской составляющей, или населением I. Остальная часть звезд (около 5%) находится в сферическом объеме с тем же диаметром, равным 30 кпк. Эти звезды называются звездами сферической составляющей или населением II. Центры линзообразной и сферической частей нашей Галактики совпадают.

Солнце расположено вблизи средней плоскости линзообразной части (ее называют галактической плоскостью) на расстоянии примерно  $2/3$  радиуса от центра Галактики, в весьма бедной звездами области. В околосолнечной области (примерно 10 кпк от центра, вблизи галактической плоскости) в объеме, приблизительно равном  $8 \text{ пк}^3$ , находится одна звезда, т. е. среднее расстояние между звездами около 2 пк. В периферийных частях линзы на одну звезду приходится объем в  $100 \text{ пк}^3$  (т. е. расстояние между звездами около 10 пк), а в центральных областях концентрация примерно в 10 млн. раз выше, чем возле Солнца (среднее расстояние между звездами около 0,01 пк, или около 2000 а. е.).

**2. Вращение Галактики.** Вся звездная система вращается вокруг оси, перпендикулярной галактической плоскости. Для Солнца период обращения около 250 000 000 лет, более далекие звезды имеют большие периоды обращения, а лежащие ближе к центру — меньшие. Центральные части Галактики вращаются как твердое тело.

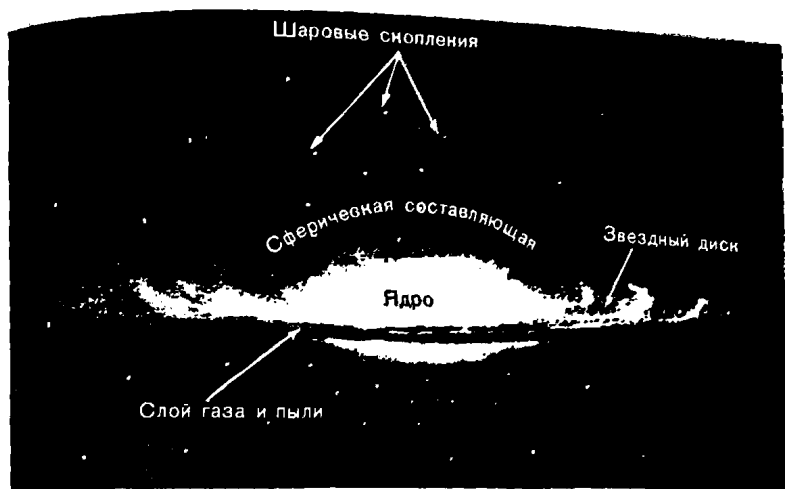


Рис. 85. Строение Галактики.

Важнейшей деталью строения Галактики является ее ядро, т. е. область Галактики возле центра. Ядро в видимом свете практически не наблюдается, так как закрыто огромным облаком поглощающей материи. Исследования ядра проводятся в инфракрасном свете и в радиоизлучении. Ядро представляет собой компактное звездное облако размерами  $4,8 \times 3,1$  кпк, в нем содержится не менее 30 млн. звезд. Внутри ядра выделяется центральное ядро диаметром всего 15—30 пк, в нем содержится не менее 3 млн. звезд, в самом центре Галактики находится ядрышко, реальные размеры которого порядка 1 пк (что меньше расстояния от Солнца до ближайшей звезды), внутри ядрышка наблюдается яркий объект, природа которого еще не выяснена. Ядро Галактики является источником мощного радиоизлучения. Из него выбрасывается вещество, масса которого достигает одной массы Солнца в год. Процессы, происходящие в ядрах звездных систем, подобных нашей Галактике, и в ней самой, до настоящего времени неясны и привлекают пристальное внимание исследователей.

## § 29. ОБЪЕКТЫ НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ

1. **Звездные скопления.** Звезды распределены в пространстве крайне неравномерно, образуя группы различного размера с разным числом членов. Кратные звездные системы содержат от 2 до 6—8 членов, обращающихся вокруг общего центра масс. Системы

с большим числом членов называются уже звездными скоплениями. Они насчитывают от нескольких десятков до сотен тысяч и миллионов звезд и имеют размеры от нескольких до 100—150 пк.

По традиции, скопления делятся на рассеянные (рис. 86) и шаровые (рис. 87). Различие в их внешнем виде вызвано различием масс.

Рассеянное скопление содержит от нескольких десятков до нескольких тысяч звезд. Силы взаимного тяготения, связывающие их в систему, невелики, и приливные воздействия со стороны ядра Галактики постепенно разрушают скопление. Поэтому возраст рассеянных скоплений от  $10^6$  до  $10^8$  лет.

Шаровые скопления содержат сотни тысяч звезд. Силы взаимного тяготения в этих скоплениях огромны, и приливные воздействия не могут нарушить сферическую форму скопления. Время существования шаровых скоплений порядка  $10^{10}$ — $10^{12}$  лет.

Рассеянные скопления встречаются главным образом в полосе Млечного Пути, в других галактиках они также находятся вблизи центральных плоскостей галактик. Шаровые скопления образуют сферическую систему с сильной концентрацией к центру Галактики. В нашей Галактике насчитывается около 200 шаровых скоплений, число рассеянных значительно больше.

Звезды скопления объединены общим происхождением, поэтому в каждом скоплении мы наблюдаем звезды одного возраста. Сопоставляя звезды разных скоплений, мы можем проследить эволюцию звезд в зависимости от их масс.

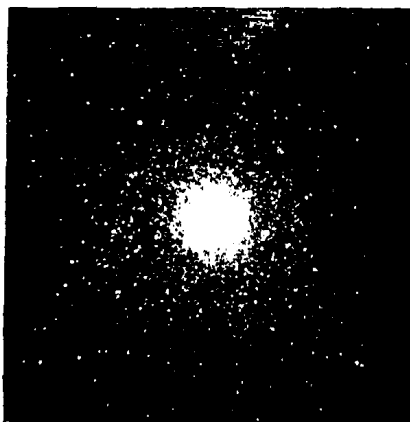
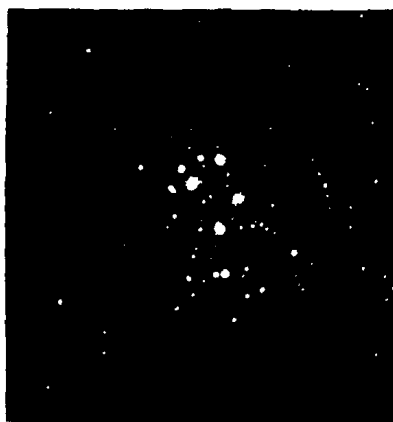


Рис. 86. Рассеянное звездное скопление. Рис. 87. Шаровое звездное скопление.

**2. Межзвездный газ в Галактике. Гравитационная неустойчивость.** Предположим, что газ в Галактике распределен равномерно и занимает весь ее объем. Звезды в Галактике расположены настолько далеко друг от друга, что практически не оказывают влияния на газ, и их роль заключается в том, что они создают общее поле тяготения, удерживающее газ от разлета в пространство. Выделим в газе некоторый сферический объем вещества радиусом  $R$ . Внутри этого объема на вещество действуют силы давления, стремящиеся расширить газ, и сила всемирного тяготения, стремящаяся его сжать. Силы давления определяются температурой и плотностью газа, а сила всемирного тяготения — плотностью и объемом. Выделяя все больший и больший объем, мы приходим к такому положению, что силы давления уже не смогут уравновесить силу тяготения. Газ начнет сжиматься. Это положение называется гравитационной неустойчивостью. Она может наступить и при уменьшении температуры газа. Ведь при этом силы давления уменьшаются, а сила гравитации остается постоянной.

При сжатии температура газа внутри выделенного объема поднимается, увеличивается давление (см. § 26) и в конце концов снова наступает равновесие. Но первоначально однородная среда газа распадается на отдельные облака. Размер каждого облака составляет несколько десятков парсек, масса — десятки тысяч масс Солнца.

Размеры облаков сравнимы с расстояниями между ними. Поэтому при движении облака сталкиваются, тормозятся и опускаются к галактической плоскости, образуя слой газовых облаков. В настоящее время почти весь газ в Галактике сосредоточен возле ее плоскости.

**3. Холодные газовые и газопылевые облака.** Газовые облака состоят из водорода и гелия с небольшой примесью других атомов. При низких температурах (а температура в большинстве туманностей около 100 К) ни водород, ни гелий не излучают в видимой области спектра. Эти облака обнаруживаются по радиоизлучению водорода на длине волны 21 см.

При достаточном охлаждении в газе начинается конденсация паров тугоплавких веществ, главным образом железа и оксидов кремния. Образуются пылинки размерами около 1 мкм, на которых осаждаются молекулы воды и более сложных соединений. В холодных газовых облаках под действием рентгеновского излуче-

ния и космических лучей может образоваться довольно много сложных молекул. Всего в настоящее время обнаружено более 50 молекул, в том числе такие сложные, как молекулы формальдегида, этилового спирта и некоторых аминокислот.

Пыли в газовых облаках образуется мало — примерно одна пылинка на  $10\text{--}100\text{ м}^3$ . Тем не менее объем облака настолько велик, что находящаяся в нем пыль загораживает свет звезд, расположенных за ним. Внешне это проявляется в том, что на фоне звездной россыпи Млечного Пути наблюдаются черные провалы — «угольные мешки», или темные туманности (рис. 88).

Температура вещества в газопылевых туманностях всегда много ниже, чем в чисто газовых. Дело в том, что излучение пылинок подчиняется законам Стефана — Больцмана и Вина. Поэтому в условиях туманности пылинки эффективно излучают в инфракрасном диапазоне. Инфракрасное излучение свободно выходит из туманности, унося энергию и понижая температуру пылинок и газа. В результате в газопылевых туманностях температура около 10 К.

4. Горячие газовые облака. Светлые туманности. Размеры газовых облаков настолько велики, что в каждом из них может находиться до нескольких сотен звезд. Если звезды относятся к холодным ( $T < 15\,000\text{ К}$ ), то их присутствие в туманности никак на ней не сказывается. Дело в том, что туманность практически полностью прозрачна для видимого света. Поглощение в этих длинах волн настолько мало, что им всегда можно пренебречь. Это обуславливается крайней разреженностью вещества туманностей. Его плотность порядка  $10^{-17}\text{ кг/м}^3$ , что соответствует концентрации  $10^7\text{--}10^8$  частиц в  $1\text{ м}^3$ .

Если же среди звезд в туманности есть очень горячие, с тем-



Рис. 88. Темная туманность Конская Голова в созвездии Ориона.

пературами 25 000—30 000 К, то картина резко меняется. У этих звезд преобладает ультрафиолетовое излучение. Ведь по закону Вина максимум излучения при этой температуре падает на длины волн короче 100 нм. Такое излучение полностью поглощается водородом. При этом происходит ионизация водорода и оторвавшийся электрон уносит с собой значительную избыточную энергию. Эта энергия передается атомам и ионам. Внутренняя энергия газа в туманности увеличивается и температура поднимается до 40 000 К.

Время от времени при столкновении иона и электрона образуется нейтральный атом водорода, т. е. происходит рекомбинация. При каждой рекомбинации обязательно излучается один квант видимого света. Именно это излучение обуславливает свечение туманностей.

Газовые и газопылевые туманности не характеризуются правильной формой, поэтому их часто называют диффузными.

Светлые и темные туманности образуют огромные комплексы размерами в сотни парсек и массами иногда до десятков тысяч масс Солнца. Один из таких комплексов — туманность Ориона — показан на рисунке 89.

Особняком стоят светлые туманности, названные планетарными. От диффузных они отличаются внешне тем, что похожи либо на колечко дыма (рис. 90), либо на круглый диск, такой,



Рис. 89. Комплекс светлых и темных туманностей — туманность Ориона.



Рис. 90. Планетарная туманность.

как диск Урана или Нептуна. Именно поэтому их и называли планетарными. Это небольшие (диаметром не более 0,1 пк и массой 0,1—0,01  $M_{\odot}$ ) облака газа, окружающие очень горячие (с температурой до 150 000 К) звезды, которые по всем характеристикам подобны белым карликам. Это последняя стадия существования красного гиганта и стадия возникновения белого карлика. Подробнее этот вопрос мы рассмотрим при изучении эволюции звезд (см. § 33).

### § 30. ГАЛАКТИКИ

**1. Внегалактические объекты.** Все звездные системы, расположенные за пределами нашей Галактики, называются галактиками (пишется со строчной буквы для отличия от нашей звездной системы, для которой слово «Галактика» с прописной буквы служит именем собственным).

Число галактик огромно. Уже существующие телескопы могут обнаружить их несколько сот миллиардов. Общее же число галактик во Вселенной вряд ли поддается подсчету. Таким образом, наблюдаемый мир — это мир галактик.

На фотографиях, снятых даже крупнейшими телескопами, большинство галактик выглядят слабыми туманными пятнышками с нерезко выраженной структурой. Тем не менее уже сейчас мы знаем достаточно много об их природе.



Рис. 91. Галактика М 31 — туманность Андромеды.

**2. Определение расстояний до галактик.** Галактики настолько далеки от нас, что непосредственно измерить расстояние даже до самой близкой из них (т. е. определить ее параллакс) невозможно. Однако в 20-х годах XX в. в крупнейший телескоп того времени удалось увидеть отдельные звезды в ближайшей к нам большой галактике — туманности Андромеды (рис. 91). Среди обнаруженных звезд были выделены

цефеиды и новые. С их помощью (см. § 25) удалось определить расстояние до туманности Андромеды, а затем и для еще нескольких близких к нам галактик. В дальнейшем были разработаны статистические методы, позволяющие определять расстояния до самых далеких объектов.

**3. Закон Хаббла.** В 1929 г. американский астроном Э. Хаббл обнаружил, что чем дальше расположена галактика, тем быстрее

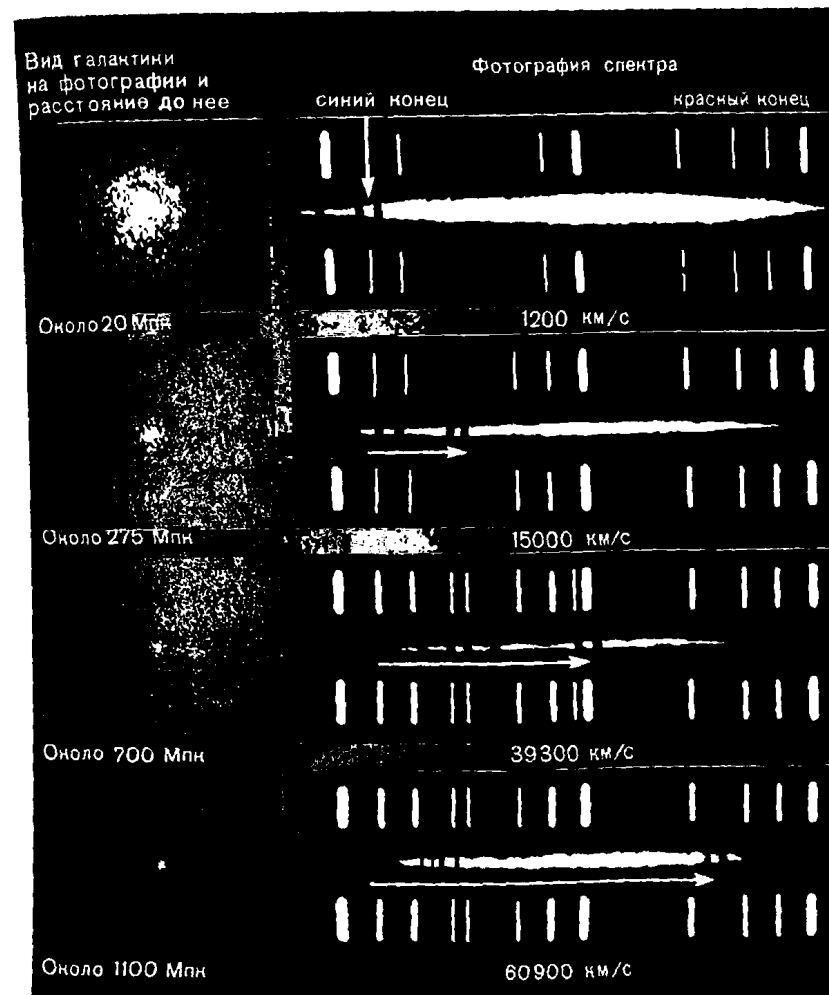


Рис. 92. Красное смещение. (Слева помещены фотографии галактик, имеющих приблизительно одинаковые размеры. Справа их спектры со спектрами сравнения. Стрелки указывают красное смещение.)

она от нас удаляется, т. е. скорость удаления галактик пропорциональна расстоянию:

$$v = Hr,$$

где  $r$  — расстояние, измеренное в мегапарсеках (1 Мпк = 1 000 000 пк), а  $H$  — постоянная Хаббла, имеющая по современным данным значение  $H = 55$  км/(с·Мпк).

Формула Хаббла позволяет, измерив положение спектральных линий в спектре галактики, определить расстояние до нее (рис. 92).

Поскольку из-за эффекта Доплера все длины волн, излучаемые удаляющимся источником, увеличиваются, то линии спектра смещаются в красную сторону. Поэтому открытое Э. Хабблом явление называется красным смещением.

**4. Основные типы галактик.** Мир галактик представляет нам невообразимое разнообразие индивидуальных форм. Тем не менее можно провести четкую их классификацию. Всего имеется три главных типа галактик.

Более половины всех изученных галактик относятся к типу спиральных (S). Несмотря на разнообразие структур, все они отличаются наличием ясно выраженного ядра и отходящих от него спиральных ветвей (рис. 93). В этих галактиках наблюдается много газовых и пылевых облаков, особенно хорошо заметных, если мы видим галактику «с ребра» (рис. 94). В спи-

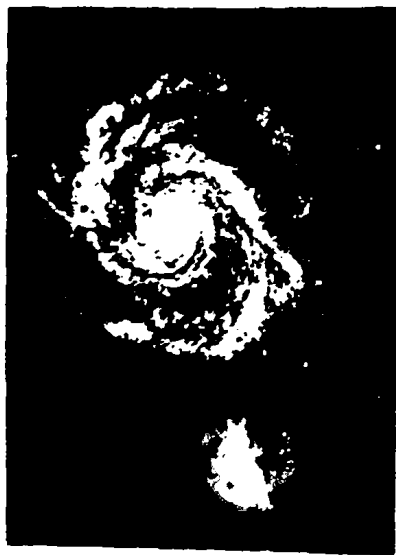


Рис. 93. Спиральная галактика, видимая «сверху». (Хорошо видна спиральная структура. На конце спиральной ветви видна маленькая галактика.)

Рис. 94. Спиральная галактика, видимая с «ребра». (Темная полоса — газопылевые туманности, расположенные в плоскости галактики.)



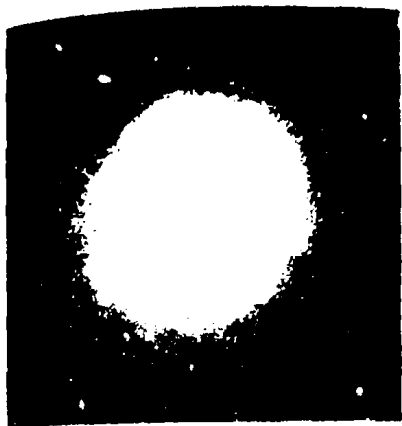


Рис. 95. Эллиптическая галактика.



Рис. 96. Большое Магелланово Облако.  
(Ближайшая к нам неправильная галактика.)

ральных галактиках идет активный процесс звездообразования, так как в них наблюдаются яркие голубые звезды. (Эти звезды существуют очень небольшой промежуток времени — всего несколько десятков миллионов лет.)

Около трети галактик относятся к типу эллиптических. Этот тип обозначается буквой Е с добавлением цифры, показывающей сжатие (от 0 до 7). Сама галактика представляется нам кружком или овалом с небольшим увеличением яркости к центру (рис. 95). В эллиптических галактиках газ и пыль (за редчайшими исключениями) полностью отсутствуют. Процесс звездообразования в них давно закончился, поэтому там нет голубых гигантов, а самые яркие звезды относятся к красным гигантам.

Все галактики, которые не удается отнести к первым двум типам, так как они не имеют определенной формы или структуры, получили название н е п р а в и л ь н ы х (тип I, рис. 96). В этих галактиках много пыли и газа и продолжается активный процесс звездообразования, о чем говорит наличие большого числа голубых и белых ярких звезд и отсутствие красных гигантов.

К неправильным галактикам принято относить и в з а и м о д е й с т в у ю щ и е (рис. 97). Обычно это две близко расположенные галактики, форма которых искажена обоюдным притяжением.

Массы галактик (их принято выражать в массах Солнца) не связаны определенным образом с типом галактик. Так, среди и



Рис. 97. Взаимодействующие галактики.

эллиптических, и спиральных галактик встречаются как сверхгиганты с массами в сотни миллиардов масс Солнца (до  $10^{13} M_{\odot}$ ), так и «пигмеи» массой всего в сотню миллионов  $M_{\odot}$ . Массы неправильных галактик всегда невелики (примерно до  $1,5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$ ).

Различие типов галактик не связано с их эволюцией, т. е. эллиптическая галактика никогда не превратится в спиральную, а последняя в неправильную, или наоборот. По-видимому (хотя этот фактор может оказаться не единственным),

тип галактики определяется условиями ее возникновения. Если галактика в момент образования получает быстрое вращение и магнитное поле большой индукции, то она наверняка превратится в спиральную, в противном случае — в эллиптическую. Что определяет образование неправильной галактики, кроме малости ее массы, в настоящее время неизвестно.

**5. Ближайшие галактики.** Самыми близкими к нам галактиками являются Большое и Малое Магеллановы Облака, хорошо видимые на небе южного полушария (см. рис. 96). Это типичные неправильные галактики, отстоящие от нас всего на 48 кпк, диаметры которых соответственно равны 17 и 6 кпк. Намного дальше (700 кпк) находится знаменитая туманность Андромеды (см. рис. 91) — сверхгигантская спиральная галактика, размеры и масса которой больше, чем у нашей Галактики. Всего же в радиусе 220 кпк от нас расположено 10 галактик, образующих Местную Группу. Все эти галактики очень малы.

**6. Скопления галактик.** Галактики всегда располагаются группами — скоплениями (рис. 98). Число галактик в скоплениях самое разнообразное: от нескольких десятков до нескольких тысяч. В скоплениях, как правило, представлены галактики самых разных размеров и типов.

В еще больших масштабах, когда сравниваются объемы, имеющие размеры в сотни и тысячи мегапарсек, распределение

материи во Вселенной оказывается однородным. Чтобы уяснить это, приведем такую аналогию. Если в разных частях комнаты выделить одинаковые сферические объемы диаметром 1 см каждый, то в них будет содержаться равное количество вещества одинаковой плотности. Определить, из какой части комнаты взят газ, будет невозможно. Поэтому говорят об однородности воздуха в комнате. Но если сравнивать объемы, размеры которых не превышают  $10^{-8}$  см, то даже два соседних будут отличаться числом атомов в них, а следовательно, и средней плотностью вещества. Так же и во Вселенной только в достаточно больших объемах содержится одинаковое число галактик, и поэтому плотность вещества в этих объемах одинакова.

**7. Активные галактики.** Особое внимание исследователей привлекают в настоящее время активные галактики. Открытие активных галактик было связано с прогрессом радиоастрономических исследований. При первом же радиообзоре неба было найдено несколько сотен (теперь уже до 10 000) компактных радиоисточников. Фотографирование областей неба, где они располо-

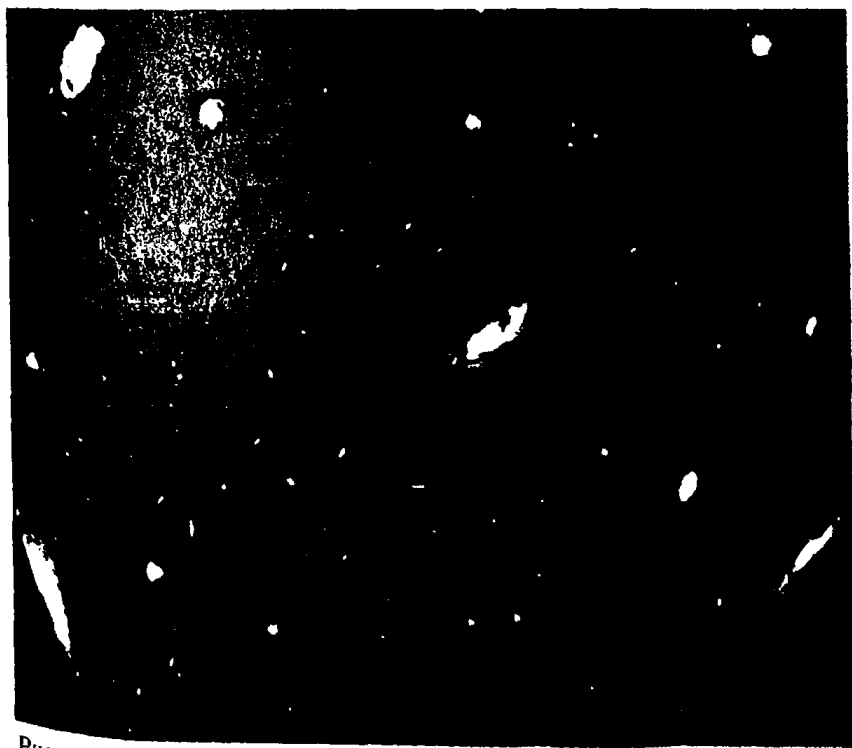


Рис. 98. Скопление галактик. (Большинство видимых на снимке объектов — галактики.)

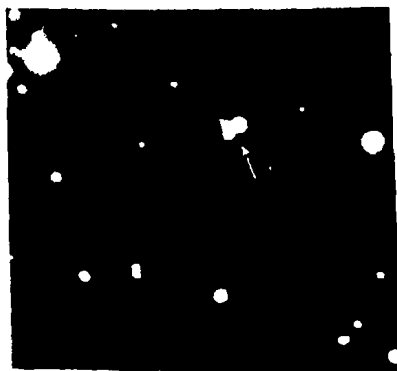


Рис. 99. Радиогалактика Лебедь А.



Рис. 100. Радиогалактика с выбросом вещества (справа сверху).

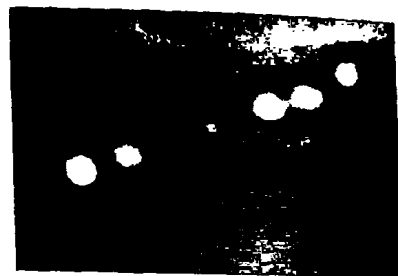


Рис. 101. Структура выброса (справа внизу).

жены, показало, что многие из них являются объектами нашей Галактики, в ряде случаев это — остатки Сверхновых. Однако часть их была отождествлена с различными галактиками. Наиболее слабыми радиоисточниками оказались спиральные галактики. В диапазоне дециметровых радиоволн мощность их излучения всего  $10^{32}$  Вт (эллиптические галактики излучают примерно в 100 раз больше), а мощность излучения в видимом свете на 3—5 порядков больше.

Но это имеет место не для всех радиоисточников. Так, радиоисточник Лебедь А (рис. 99) отождествляется с довольно слабой (а следовательно, и далекой) галактикой. При этом оказывается, что мощность излучения в радиодиапазоне примерно вдвое превышает оптический поток (т. е. мощность излучения в видимом свете) и в миллион раз — мощность радиоизлучения обычных галактик. Более того, оказалось, что радиоизлучение генерируется в двух областях, расположенных на расстоянии 10 000 св. лет от центра галактики. Такое строение радиоисточников довольно характерно, хотя есть и такие радиогалактики, в которых область излучения совпадает с самой галактикой. Для

многих радиогалактик характерно и усиленное рентгеновское излучение. Так, мощность галактики М 87 (она же радиисточник Дева А) в радиодиапазоне составляет  $10^{33}$  Вт, а в рентгеновском —  $10^{35}$  Вт. Распределение энергии в спектре этих источников не имеет ничего общего с распределением в спектре нагретого тела. Радиоизлучение галактик возникает при движении сверхбыстрых (релятивистских) электронов в магнитных полях в галактике.

Во многих радиогалактиках видны выбросы (рис. 100). По-видимому, мы наблюдаем взрывы сложной структуры (рис. 101), во время которых выделяется колоссальная энергия до  $10^{48}$  Дж. Правда, до настоящего времени мы не имеем скольконибудь убедительной теории, описывающей физические явления при таких взрывах.

В последнее время внимание исследователей особенно привлекают процессы, связанные с активностью ядер галактик. С одним из них — резким усилением радиоизлучения — мы только что познакомимся. Другие активные галактики характерны наличием ярких ядер, часто с необычным распределением энергии в спектре. В таких ядрах наблюдаются (по особенностям спектра) бурные движения газа со скоростями от 500 до 4000 км/с. При этом сами ядра имеют ничтожные размеры, часто не превышающие 10 пк. Некоторые объекты оказываются переменными, их светимости могут изменяться в 400—1000 раз. Природа процессов в активных галактиках до сего времени остается практически совершенно непонятной.

**7. Квазары.** Но еще более непонятными объектами являются так называемые квазизвездные радиоисточники, или квазары. Эти объекты были открыты как точечные радиоисточники. Отождествление их с видимыми объектами сначала привело к заключению о том, что это радиозвезды, так как соответствующие им видимые объекты ничем от звезд не отличались. Однако когда были получены их спектры, найдены скорости удаления и определены расстояния до них, то последние оказались фантастически огромными, более миллиарда световых лет (для квазара, обозначаемого 3C273, — 3 млрд. св. лет, для 3C9 — 12 млрд. св. лет). Но, определив поток излучения и зная расстояние до объекта, можно вычислить его светимость. Она оказалась огромной —  $10^{39}$  Вт, т. е. минимум в 100 раз больше светимости обычной галактики. Более того, выяснилось, что основ-

ную часть энергии квазар излучает в инфракрасном диапазоне, причем мощность этого излучения оценивается совершенно невероятной цифрой —  $10^{42}$  Вт, т. е. она в 100 тыс. раз превышает светимость нашей Галактики. Но еще большее удивление вызвало открытие переменности квазаров. Оказалось, что светимость квазара может меняться почти в 20 раз, причем у некоторых из них она изменяется в течение недели. Но в этом случае размеры излучающей области не могут превышать расстояния, проходимого светом за это время, т. е.  $10^{13}$ — $10^{14}$  м, что составляет всего около 1000 а.е.

В последние годы появляется все больше фактов, которые позволяют связать квазары с ядрами активных галактик. По-видимому, это явления одного типа, но разных масштабов. Не исключена возможность, что квазар постепенно превращается в активную галактику, а она, в свою очередь, — в обычную.

Изучение квазаров — одна из наиболее интересных задач астрофизики.

#### Контрольные вопросы и задачи к главе VI

1. Опишите различия между рассеянными и шаровыми скоплениями. Чем они определяются?
2. Перечислите основные подсистемы звезд в Галактике.
3. Чем отличаются газовые и газопылевые туманности?
4. Светимость галактики  $10^{37}$  Вт, масса  $10^{11} M_{\odot}$ . Вычислите время существования этой галактики, считая, что свечение звезд в ней поддерживается горением водорода, который полностью выгорает.
5. Перечислите и охарактеризуйте типы галактик.
6. Определите расстояния до галактик, если они удаляются от нас со скоростями 550, 2200, 22 000 км/с.
7. Источником энергии квазара является падение вещества на «черную дыру», в результате чего выделяется  $0,2 mc^2$  Дж энергии. Оцените расход массы, если мощность квазара  $10^{41}$  Вт.
8. Оцените и сравните время существования квазара, если его масса равна массе Галактики, а свечение поддерживается в одном случае падением вещества на «черную дыру», а во втором — горением водорода ( $L=10^{11}$  Вт).

## Глава VII

### РАЗВИВАЮЩИЙСЯ МИР

#### § 31. БОЛЬШАЯ ВСЕЛЕННАЯ

**1. Ньютонова модель мира.** Появление системы Коперника, поместившего в центре мира (Вселенной) не Землю, а Солнце, сделало ненужным само понятие центра мира и в конце концов привело к построению первой научной системы мира, основанной на теории Ньютона и получившей название ньютоновской.

По Ньютону мир представляет собой бесконечное пространство, в котором выполняются все постулаты геометрии Евклида. Пространство неограниченно простирается во все стороны, время всегда и везде течет равномерно. Мир бесконечен во времени и в пространстве и однороден, т. е. если взять достаточно большой объем, то свойства материи, находящейся в этом объеме (главным из которых является средняя плотность материи в этом объеме), ничем не отличаются от свойств материи, заключенной в любом другом таком же объеме. Все тела во Вселенной связаны силами всемирного тяготения, определяющими их движение.

Такая система мира, или, как чаще говорят, такая модель Вселенной, встречается со значительными трудностями. Так как все тела связаны между собой силой взаимного притяжения, определяемой по закону всемирного тяготения, то для вычисления сил, действующих на данное тело, необходимо суммировать притяжение всех тел в бесконечном пространстве. Но такая сумма вообще не может быть вычислена, ибо оказывается либо бесконечно большой, либо равной нулю, либо неопределенной — в зависимости от способа вычислений. Таким образом, теория приводит к выводу об отсутствии силы тяжести, что явно противоречит наблюдениям. Это положение называется гравитационным парадоксом. Существует еще фотометрический парадокс. Он заключается в том, что в бесконечной, равномерно заполненной звездами Вселенной луч зрения, идущий в любом направлении, обязательно встретится с поверхностью звезды. А это означает, что небо всюду должно быть столь же ярким, как Солнце. Поясним этот парадокс подробнее.

Рассмотрим бесконечную Вселенную, равномерно заполненную звездами (или галактиками, или их скоплениями). Пусть концентрация звезд будет  $n$ , по предположению она всюду одинакова. Вырежем в пространстве сферический слой радиуса  $r$  и толщиной  $\Delta r$  ( $\Delta r < r$ ). В этом слое содержится  $4\pi nr^2 \cdot \Delta r$  звезд. Допустим, что средний радиус звезды равен  $R_*$ . Тогда доля поверхности слоя, закрытая звездами, определится отношением:

$$\frac{\text{суммарная площадь дисков звезд}}{\text{площадь поверхности слоя}} = \frac{4\pi R_*^2 \cdot 4\pi nr^2 \cdot \Delta r n}{4\pi r^2} = 4\pi R_*^2 \cdot \Delta r n.$$

Таким образом, эта доля не зависит от радиуса слоя. Взяв достаточно число таких слоев, мы добьемся того, что все небо будет закрыто дисками звезд и оно будет столь же ярким, как диск Солнца. Очевидно, что это противоречит наблюдениям.

В поисках решения этого парадокса в конце прошлого века была предложена так называемая иерархическая модель Вселенной. Согласно этой модели, Вселенная построена так, что при переходе от звезд к их скоплениям, от звездных скоплений — к Галактике, от нее — к скоплениям галактик и т. д. плотность каждой следующей системы понижается. В такой Вселенной нет гравитационного и фотометрического парадоксов, но средняя плотность вещества во всей Вселенной равна нулю, а это прямо противоречит наблюдениям.

Данные наблюдений показывают, что начиная с объема диаметром в несколько сот мегапарсек средняя плотность вещества во Вселенной остается постоянной и равной (если учитывать только наблюдаемые формы материи)  $3 \cdot 10^{-28}$  кг/м<sup>3</sup>, или 1 атом водорода на 20 м<sup>3</sup>. Однако возможно, что в действительности ее среднюю плотность определяют ненаблюдаемые формы материи. Так, если подтвердятся данные советских ученых о наличии массы покоя у нейтрино, то средняя плотность вещества во Вселенной окажется примерно в 100 раз больше, чем оцениваемая по наблюдаемой материи.

**2. Общая теория относительности.** В начале XX в. А. Эйнштейн построил новую теорию пространства — времени — тяготения, названную общей теорией относительности (ОТО). Это очень сложная и глубокая теория о свойствах пространства и времени и связи этих свойств с распределением и движением материи во Вселенной, она позволила совершенно по-новому взглянуть на проблему строения Вселенной в целом.

Вообще вопрос о применении той или иной теории ко всей Вселенной — один из наиболее сложных вопросов философии естествознания. Ведь свойства Вселенной неисчерпаемы, и наше знание может только неограниченно приближаться к абсолютной истине, никогда не достигая ее. Но единственным критерием истинности является практика. Поэтому, применив теорию к Вселенной в целом, мы рано или поздно придем к противоречию с наблюдениями, что даст нам возможность познать границы применения данной теории и сделать новый шаг в познании мира.

Так, применение теории Ньютона ко всей Вселенной в целом привело к фотометрическому и гравитационному парадоксам и показало, что ее можно использовать только при скоростях, много меньших скорости света и в слабых гравитационных полях. В результате теория Ньютона была заменена более общей теорией, но осталась правильной в области своей применимости.

Отметим прежде всего, что в ОТО не возникает гравитационного парадокса, так как суммарное действие удаленных тел обязательно равно нулю. (О разрешении фотометрического парадокса будет сказано ниже.) Свойства пространства — времени в ОТО оказались весьма неожиданными. Прежде всего, здесь течение времени зависит от распределения материи. В частности, вблизи больших тяготеющих масс время идет медленнее. Мы воспринимаем это как уменьшение частоты колебаний света, выходящего из области, близкой к тяжелой массе. Эффект этот чрезвычайно мал, но в непосредственном физическом эксперименте его удалось обнаружить. Так, при движении в поле тяготения Земли свет в луче, поднимающемся вверх, уменьшает свою частоту в строгом соответствии с ОТО.

В больших масштабах свойства пространства оказались зависящими от средней плотности вещества ( $\rho$ ). Если она меньше критического значения ( $\rho_k$ ), равного  $3 \cdot 10^{-27}$  кг/м<sup>3</sup>, то мир бесконечен во времени и пространстве, а геометрия его описывается геометрией Лобачевского, согласно которой через данную точку можно провести сколько угодно прямых, не пересекающих заданную. При средней плотности, равной критической, мир описывается геометрией Евклида, а при большей — геометрией Римана, согласно которой через точку вообще нельзя провести ни одной прямой, параллельной данной, и мир имеет определенный конечный объем и массу. Конечно, это не означает, что существует граница мира. Ближайшим привычным нам аналогом явля-

ется поверхность сферы. Она тоже конечна и нигде не имеет границ. Более подробного рассмотрения этого вопроса мы привести не можем.

**3. Модель Фридмана.** В 20-х годах нашего столетия советскому физику А. А. Фридману удалось доказать, что в ОТО возможны нестационарные, т. е. меняющиеся во времени, модели Вселенной. Наш мир должен либо сжиматься, либо расширяться. К сожалению, в эти термины вкладывается не совсем то содержание, к которому мы привыкли, но можно сказать, что с точки зрения наблюдателя (независимо от того, в какой точке мира он находится, ведь мир однороден и в каждой точке все происходит так же, как и во всех остальных) все далекие объекты (галактики) от него удаляются с тем большей скоростью, чем дальше они расположены. Именно это расширение было открыто Э. Хабблом через несколько лет после выхода в свет работ А. А. Фридмана. Судьба мира зависит от средней плотности материи. Если она меньше или равна критической, то расширение будет продолжаться вечно, если же нет, то расширение постепенно остановится и сменится сжатием.

В расширяющейся Вселенной не возникает фотометрического парадокса, так как из-за красного смещения (закон Хаббла) энергия квантов света, идущего от удаленного источника, уменьшается. В результате полная энергия, приходящая с единицы площади небесной сферы, оказывается достаточно малой и небо кажется нам темным.

Если двигаться от настоящего времени назад, то в прошлом (а при  $\bar{\rho} > \rho_k$  и в будущем) обязательно находится момент, в который плотность вещества в мире становится бесконечно большой. Но еще раньше наступит граница применимости нашей теории. Мы наверняка знаем, что ОТО не может быть применена при плотностях порядка  $10^{96}$  кг/м<sup>3</sup>, а вероятнее всего и при много меньших плотностях. В этих условиях появляются еще не вполне понятные нам эффекты. Теории такого состояния еще не существует.

## § 32. ОТ «БОЛЬШОГО ВЗРЫВА» ДО ОБРАЗОВАНИЯ ГАЛАКТИК

**1. Эволюция Вселенной.** После того как наблюдения показали справедливость или, по меньшей мере, применимость моделей Фридмана ко всей Вселенной в целом, была построена теория «Большого взрыва», в которой рассматривается эволюция Все-

ленной в целом. Отметим сразу, что термин «Большой взрыв» не слишком удачен, поскольку ассоциируется с расширением в пространстве, хотя в теории идет речь о расширении самого пространства. Это вещи разные, но, к сожалению, никакой разумной аналогии с привычными нам понятиями и явлениями здесь провести невозможно. Отметим еще раз, что единственными наблюдаемыми эффектами являются уменьшение средних температур и плотности материи во Вселенной и увеличение расстояний между удаленными на много миллионов парсек галактиками.

**2. Начало расширения.** Отметим, что самое начало «Большого взрыва» мы исследовать не можем. Наша теория становится применимой только тогда, когда средняя плотность вещества падает примерно до  $10^{20}$  кг/м<sup>3</sup>, а температура — до  $10^{12}$  К, это происходит примерно к моменту, равному 0,00001 с после начала расширения (соответствует моменту  $t=0$ ). В указанный момент основную роль во Вселенной играет излучение. Вещество представлено самыми разнообразными элементарными частицами и античастицами, непрерывно вступающими в реакции с квантами излучения и между собой, рождаясь и исчезая вновь в реакциях аннигиляции. К концу этого промежутка времени, когда температура и плотность падают ниже указанных значений ( $t=0,0001$  с), в реакциях аннигиляции исчезают все античастицы. При этом оказывается, что частиц было несколько больше. На 100 000 000 античастиц (антипротонов и позитронов) приходится 100 000 001 частица (протонов и электронов). В результате сейчас наш мир состоит из протонов и электронов, а не из антипротонов и позитронов. Причина такой асимметрии пока еще неизвестна.

К моменту  $t=0,0001$  с температура падает до 10 млрд. кельвин и в столкновениях частиц уже не могут рождаться протоны и антипротоны. В этот период основным является рождение электрон-позитронных пар и их аннигиляция. В этих реакциях происходит рождение очень слабо реагирующих с веществом частиц — нейтрино и антинейтрино, но уже через 0,2 с плотность вещества упадет настолько, что нейтрино перестанут реагировать с веществом. С этого момента нейтринный газ существует как бы сам по себе, практически не взаимодействуя с остальным веществом. К настоящему времени нейтринный газ во Вселенной охладился до 2 К, и нет надежд на то, что нейтрино столь малых энергий удастся непосредственно обнаружить в эксперименте.

Через некоторое время после обособления нейтрино начинается эпоха ядерных реакций с участием протонов. Она продолжается всего около 9 с и к моменту, когда температура вещества падает до миллиарда кельвин, успевает прореагировать около 30% наличного водорода, и во Вселенной устанавливается наблюдаемый ныне химический состав (70% H и 30% He). Ядерные реакции заканчиваются примерно через 10 с после начала расширения.

**3. Радиационно-доминирующая стадия расширения.** Следующая эпоха, в которой температура вещества падает до 3500—4000 К, продолжается около миллиона лет. В это время давление излучения (давление света) намного превышает давление вещества. Это приводит к тому, что вещество и излучение однородно распределены во Вселенной.

До температуры 3500—4000 К вещество представляет собой плазму, т. е. нейтральную смесь протонов, ядер гелия и электронов. Плазма чрезвычайно сильно взаимодействует с излучением. Но при более низких температурах начинается рекомбинация: ядра атомов захватывают электроны и превращаются в нейтральные атомы, которые могут поглощать свет только определенных длин волн. Вещество становится прозрачным и излучение с ним уже не взаимодействует. С этого момента излучение и вещество эволюционируют раздельно.

**4. Образование реликтового излучения.** Может показаться, что все вышесказанное — обычная фантазия, такое впечатление складывается при сравнении секундной длительности периода с миллиардами лет, прошедшими с того времени. Но наш расчет основан на самых общих и глубоких законах физики и на утверждениях, что эти законы действуют при плотностях до  $10^{19}$  кг/м<sup>3</sup>. Второе предположение, положенное в основу расчетов, то, что материя в эпоху высоких плотностей и температур с большой точностью была распределена однородно. Этот факт поддается опытной проверке. Излучение, вышедшее в момент, когда температура вещества упала до 4000 К, приходит к нам в настоящее время из областей, удаленных на миллиарды световых лет. По закону Хаббла, эти области удаляются от нас со скоростью, близкой к скорости света. Эффект Доплера в этом случае колоссален (формула смещения длин волн, приведенная в § 25, при таких скоростях неприменима, нужно пользоваться значительно более сложными формулами теории относительности), и отношение

$\frac{\lambda_{\text{галак}}}{\lambda_{\text{изм}}}$  равно примерно 1000, т. е.

пришедшее к нам излучение должно иметь максимум в длине волны около 1 мм, поскольку по закону Вина  $\lambda_{\text{мах}}$  для  $T = 4000 \text{ К}$  равно 725 нм. Это излучение, получившее название реликтового, было открыто в 1965 г. Исследования последних лет показали, что оно приходит со всех направлений с одинаковой интенсивностью, т. е. вещество в то время было действительно с высокой точностью однородно.

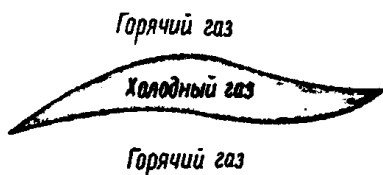


Рис. 102. Схема «блина».

Вторым проверяемым следствием теории «Большого взрыва» является химический состав вещества, точнее, соотношение числа атомов водорода и гелия. Эта величина, получаемая из расчетов, хорошо совпадает с наблюдаемой.

**5. Возникновение галактик.** Рекомбинация водорода и гелия приводит к тому, что излучение и вещество практически перестают взаимодействовать, давление света исчезает и равновесие вещества определяется в дальнейшем только давлением вещества. Поскольку это давление невелико, наступает гравитационная неустойчивость (см. § 29). Вещество массой примерно  $10^{15} M_{\odot}$  (это масса скопления галактик) начинает сжиматься. Сжатие вещества в различных направлениях происходит с разными скоростями. Эти различия вначале незначительны, но быстро увеличиваются. В результате газ сжимается в плоское образование, названное «блином» (рис. 102). При сжатии газа его температура во внешних слоях достигает многих миллионов кельвин. Поскольку во внутренних частях плотность увеличивается быстро, то температура там растет медленнее и не достигает столь больших значений. Обусловливается это тем, что энергия излучения пропорциональна квадрату плотности вещества, следовательно, излучение интенсивно уменьшает внутреннюю энергию газа именно в центральных частях «блина». Увеличение плотности приводит к очередному этапу гравитационной неустойчивости. Средняя часть «блина» распадается на облака газа с массами порядка  $10^9$ — $10^{13} M_{\odot}$ , из которых в дальнейшем формируются галактики. Так возникает скопление галактик, погруженное в облако крайне разреженного, нагретого до миллионов кельвин газа. Эта картина хорошо подтверждается наблюдениями в оптическом и рентгеновском диапазонах.

**1. Формирование звезды.** Мы начинаем наше рассмотрение с эволюции звезд, поскольку именно она определяет эволюцию звездных систем и галактик.

Звезда начинает формироваться в момент, когда в газовом облаке появляются пылинки и падает температура. Уменьшение давления, являющееся прямым следствием падения температуры, приводит к тому, что силы притяжения начинают сжимать облако. Сжатие обуславливает выделение энергии (см. § 26), но температура газа не увеличивается, а даже падает, так как пыль эффективно излучает и отводит энергию из облака. Очень важно, что сжатие происходит неравномерно. Центральные области сжимаются намного быстрее периферии. В результате в центре плотность увеличивается настолько, что инфракрасное излучение уже не может свободно проходить через вещество, температура вещества поднимается, и сжатие в центральных областях останавливается из-за увеличения давления.

Наконец образуется объект, в центре которого расположена уже сформировавшаяся звезда, а на периферии — почти сферическая оболочка (рис. 103), содержащая пыль и газ и практически непрозрачная для видимого излучения. Постепенно температура

в оболочке увеличивается, и она становится прозрачной. Возможно, что оболочка делается прозрачной из-за того, что материя во вращающемся облаке стремится сконцентрироваться вблизи экваториальной плоскости. В этом случае у звезды формируется протопланетный диск. Такие диски, или остатки непрозрачных облаков, были обнаружены у некоторых ближайших звезд по их инфракрасному излучению.

Как только оболочка делается прозрачной, звезда становится видимой, и с этого момента начинается ее история.

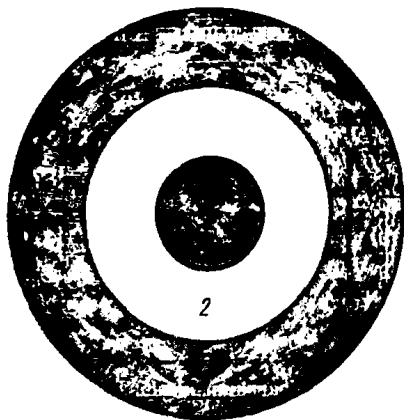


Рис. 103. Возникновение звезды. Стадия кокона: 1 — образующаяся звезда; 2 — свободная от пыли полость; 3 — непрозрачная газопылевая оболочка — остаток облака, из которого формируется звезда.

**2. Начальная стадия эволюции звезды.** Температура в центре только что образовавшейся звезды (точка 1 на рис. 104) недостаточна для начала ядерных реакций. Единственным источником энергии для этого момента является гравитационное сжатие. Поскольку светимость звезды на этом этапе велика, то сжатие происходит быстро. Сначала звезда движется по диаграмме Г—Р вниз (ее поверхностная температура остается постоянной), затем температура поверхности

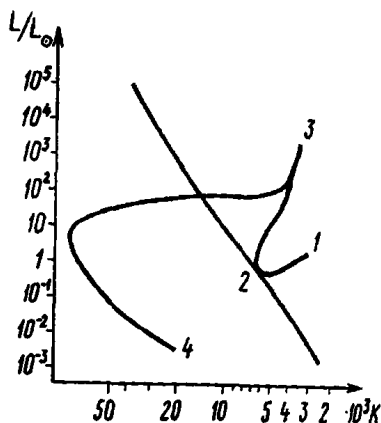


Рис. 104. Эволюция звезды с массой, близкой к массе Солнца.

начинает возрастать и постоянной остается уже светимость. Наконец звезда приходит на главную последовательность.

Продолжительность начальной стадии эволюции звезды сильно зависит от ее массы. Так, звезде массой, равной  $1 M_{\odot}$ , чтобы прийти на главную последовательность, требуется около 1 млн. лет, звезде массой  $10 M_{\odot}$  — примерно в 1000 раз меньше, а звезде массой около  $0.1 M_{\odot}$  для этого требуются десятки миллиардов лет. Эти звезды еще не пришли на главную последовательность и, возможно, никогда ее не достигнут.

**3. Стадия главной последовательности.** На стадии главной последовательности звезда (точка 2 на рис. 104) светит за счет выделения энергии в реакциях горения водорода. Запас водорода обеспечивает светимость звезды массой, равной массе Солнца, примерно в течение  $10^{10}$  лет. Звезды большей массы расходуют свои запасы быстрее. Так, звезда массой в  $10 M_{\odot}$  израсходует водород за  $10^7$  лет (светимость звезды пропорциональна 4-й степени массы).

После того как в энерговыделяющей зоне звезды окончится водород, выделение энергии уменьшится и ядро начнет сжиматься. Сжатие приведет к повышению температуры, и в недрах звезды загорится гелий.

Описанные стадии проходят практически одинаково для звезд любой массы. Различия в эволюции на этих стадиях проявляются только в ее скорости.

4. Стадия красного гиганта. На следующей стадии эволюции звезды (точка 3 на рис. 104) основным ядерным горючим является гелий. Слияние трех ядер атомов гелия в ядро атома углерода приводит к меньшему выделению энергии, чем при превращении четырех протонов в ядро гелия. В ядерных реакциях с более тяжелыми элементами выход энергии еще меньше. Поэтому длительность последовательных эволюционных стадий звезд, как правило, уменьшается. Кроме того, теперь эволюции звезд с массами, меньшими и большими 1,4 массы Солнца, существенно отличаются.

Рассмотрим сначала эволюцию менее массивных звезд. На диаграмме Г—Р эволюционирующая звезда идет от главной последовательности к области красных гигантов. В это время внутри звезды формируется ядро, состоящее из вырожденного газа. Масса звезды, а следовательно, и ее тяготение невелики, поэтому на определенном этапе от звезды отделяется верхняя часть конвективной оболочки, образуя планетарную туманность. Оставшееся ядро из вырожденного газа превращается в белый карлик (точка 4 на рис. 104). В нем уже не идут ядерные реакции, и его излучение поддерживается медленным остыванием и сжатием. В таком состоянии белый карлик может существовать практически вечно. Это последняя стадия эволюции звезды массой меньше  $1,4 M_{\odot}$ .

Если же масса звезды превышает 1,4 массы Солнца, то в центральных областях по мере сжатия температура повышается настолько, что все время включаются все новые и новые ядерные реакции со все более и более тяжелыми атомными ядрами. Это обуславливает очень сложный путь звезды по диаграмме Г—Р. В конце концов в центре звезды образуется ядро из железа. Но в железе ядерные реакции с выделением энергии невозможны, поэтому выделение ядерной энергии в ядре прекращается и оно начинает быстро сжиматься. В результате температура в нем повышается до 3 млрд. кельвин. Но при такой температуре происходит, во-первых, бурное образование нейтрино, во-вторых, начинается распад атомных ядер железа на ядра гелия и нейтроны. Оба процесса требуют огромной затраты энергии, вследствие чего температура и давление падают в тысячи раз. Сила давления уже не в состоянии уравновесить гравитационную силу, и верхние слои звезды начинают неудержимо падать к центру звезды. Энергия, выделяющаяся в центральных областях, по-прежнему

уносится нейтринно и расходуется на распад атомов железа, что препятствует повышению температуры в ядре. Но в прилегающих к ядру слоях, там, где преобладают ядра кислорода и углерода, температура при сжатии растет. Наконец она достигает значений, при которых начинаются ядерные реакции с участием гелия, кислорода и углерода. Темп выделения энергии в этих реакциях пропорционален  $T^{100}$ , поэтому процесс горения этих элементов носит характер взрыва. Астрофизики говорят, что происходит детонация ядерного топлива и грандиозный взрыв, который мы наблюдаем как вспышку Сверхновой. В процессе взрыва сбрасывается оболочка, в которой в результате сложной цепи ядерных реакций образуются химические элементы вплоть до самых тяжелых трансуранов (калифорний). Это вещество перемешивается с газовыми облаками галактики, обогащая их тяжелыми элементами.

**5. Последние стадии эволюции звезд. «Черные дыры».** На месте вспышки остается либо белый карлик (если масса звезды меньше  $1,4 M_{\odot}$ ), либо нейтронная звезда (если масса меньше  $2,5 M_{\odot}$ ). При большей массе остатка образуется «черная дыра».

По мере сжатия звезды вторая космическая скорость, т. е. скорость, необходимая для того, чтобы покинуть звезду, непрерывно увеличивается. С точки зрения теории Ньютона, ничто не препятствует увеличению этой скорости до бесконечности, звезда при этом может сжаться в точку. Но специальная теория относительности устанавливает предел увеличению скорости до скорости света, т. е. ничто не может двигаться со скоростью, большей скорости света. Поэтому, когда радиус сжимающейся звезды будет приближаться к величине\*

$$r_g = \frac{2GM_*}{c^2},$$

которая называется гравитационным радиусом, картина сжатия изменится. Для внешнего наблюдателя, т. е. наблюдателя, достаточно удаленного от звезды, темп сжатия начнет уменьшаться, длины волн излучаемого света будут все больше и больше смещаться в красную сторону, свет звезды покраснеет и померкнет. Очень скоро звезда станет ненаблюдаемой.

В результате образуется тело достаточно малого радиуса,

---

\* Определяется из условия равенства второй космической скорости и скорости света.

с поверхности которого в окружающее пространство не может выйти ничто, в том числе и световой сигнал. Это тело и называется «черной дырой». Оно не имеет другой связи с окружающей Вселенной, кроме мощного гравитационного поля, создаваемого им.

Очень важен и интересен вопрос о том, существуют ли реально «черные дыры» или они порождены воображением теоретиков. Обнаружить «черную дыру» можно только одним способом. Если она входит в состав двойной системы, то может оказаться, что более массивная звезда пары уже проэволюционировала и превратилась в «черную дыру», а меньшая звезда еще находится в стадии красного гиганта. Тогда мощное гравитационное поле «черной дыры» может как бы вытягивать вещество из красного гиганта. Это вещество, попадая на «черную дыру», ускоряется, разогревается и излучает избыток энергии в рентгеновском диапазоне. На небе появляется мощный источник рентгеновского излучения. Не исключена возможность, что рентгеновский источник в созвездии Лебедя, обозначаемый как Лебедь X-1, в действительности является «черной дырой», хотя полной уверенности в этом еще нет.

Белый карлик, нейтронная звезда, «черная дыра» являются конечными стадиями эволюции звезд. Длительность этих стадий практически не ограничена.

«Черные дыры» могут иметь любую, сколь угодно большую массу. При этом, как видно из вышеприведенной формулы, их размеры возрастают. Если подставить все известные нам значения величин, входящих в формулу для определения радиуса «черной дыры», то получим:

$$R = 3M_*,$$

где  $M_*$  — масса звезды в массах Солнца, а  $R$  — радиус в километрах. При падении вещества на «черную дыру» может выделяться огромная энергия (порядка  $\approx 0,2M_*c^2$ ), т. е. примерно пятая часть энергии, заключенной в веществе. Больше выделяется энергии только при реакции аннигиляции, т. е. при соединении вещества и антивещества.

Не исключена возможность, что в ядрах квазаров существуют огромные «черные дыры» с массами в сотни миллионов масс Солнца и что именно падение вещества на эти «черные дыры» обуславливает огромную светимость квазаров. Ответ на этот вопрос — дело будущего.

**1. Образование галактик.** Вернемся теперь к рассмотрению эволюции галактик. Как уже говорилось выше (см. § 32), образовавшийся «блин» с массой около  $10^{15}$  масс Солнца неустойчив и распадается на отдельные сгустки, которые и дают начало будущим галактикам.

Галактика образуется как огромный газовый шар, диаметр которого лишь незначительно превышает диаметр будущей галактики. Движения газа в нем хаотические, т. е. облака газа заполняют весь объем шара, двигаясь главным образом в радиальных направлениях. Весь шар вращается как целое. Сразу после возникновения протогалактики в ней начинается бурный процесс звездообразования. Вспомним, что при первичном космическом расширении образуются только водород и гелий, поэтому звезды первого поколения будут иметь большие и очень большие массы и эволюционировать очень быстро. Эволюция таких массивных звезд заканчивается взрывом Сверхновых, которые выбрасывают газ, богатый тяжелыми химическими элементами.

На начальной стадии существования галактики бурные движения газа приведут к быстрому перемешиванию вещества, и химический состав его будет медленно изменяться. Содержание тяжелых химических элементов в газе будет медленно возрастать.

**2. Возникновение галактического диска.** Образовавшиеся звезды очень слабо взаимодействуют между собой, так как столкновения или даже тесные прохождения между ними чрезвычайно редки. Поэтому звезды сохраняют особенности движения тех облаков газа, из которых они образовались.

А газовые облака сталкиваются очень часто. При этом если в самом начале своего существования протогалактика вращалась достаточно быстро, то столкновения газовых облаков приведут к тому, что их хаотические скорости уменьшатся, газ (а на более позднем этапе, когда содержание тяжелых элементов увеличится, и пыль) будет концентрироваться в экваториальной плоскости галактики.

В быстро вращающейся галактике звезды первого поколения сохраняют скорости породивших их хаотически двигавшихся облаков газа. До нашего времени сохранились только наименее массивные звезды этого поколения — теперь это звезды сферической составляющей нашей Галактики. По мере того как газовые облака концентрируются к экваториальной плоскости (теперь ее

можно уже назвать галактической), образуются сначала звезды промежуточных систем, а в настоящее время идет образование звезд,двигающихся вблизи галактической плоскости, т. е. плоской подсистемы галактики.

Во вращающемся «диске», содержащем звезды, пыль и газ, возникают возмущения плотности. Из-за того, что галактика вращается не как твердое тело, возмущения вытягиваются в спираль, в которой скорость движения звезд и газовых облаков вокруг центра галактики уменьшается, что приводит к уплотнению газа и бурному звездообразованию. Поэтому на краю возмущения возникает избыток молодых ярких голубых звезд. Так образуется узор спиральных галактик (см. рис. 93).

Если же скорость вращения протогалактики невелика, то в результате хаотических движений облаков газа она сохранит свою близкую к шару форму. Довольно быстро весь газ в ней израсходуется на образование звезд, процесс звездообразования затухнет, и возникнет типичная эллиптическая галактика.

Галактика малой массы не принимает правильной формы. Вращение ее достаточно медленное, процесс звездообразования затянут, и сейчас в такой галактике мы наблюдаем большое число молодых голубых звезд.

По мере развития любой галактики наступает момент, когда все запасы газа и пыли окажутся исчерпанными, звездообразование прекратится, закончится и эволюция самой галактики.

## § 36. ПРОИСХОЖДЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

**1. Образование протопланетного диска и его эволюция.** Вопрос о происхождении Солнечной системы чрезвычайно важен, ибо только зная процессы образования и эволюции планет, можно решить важнейшие вопросы геологии. Кроме того, теория происхождения планетной системы должна помочь ответить и на вопрос, сколь обычным образованием она является, что, в свою очередь, необходимо для решения проблемы внеземных цивилизаций. Законченной теории происхождения планетной системы еще не существует; разработана гипотеза, которая, конечно, будет уточнена, но вряд ли испытает существенные изменения.

Согласно существующим представлениям, около 5 млрд. лет назад в протяженном газопылевом облаке, пронизанном довольно сильным магнитным полем, образовалось сгущение — протосолнце. Оно медленно сжималось, давая начало современно-

му Солнцу, остальная часть облака с массой примерно в 10 раз меньшей вращалась вокруг протосолнца. В результате столкновения пылинок, атомов, молекул туманность сплющивалась и разогревалась. Так вокруг возникающего Солнца возник газопылевой протопланетный диск.

В дальнейшем развитии протопланетного диска большую роль играли процессы, происходящие на поверхности рождающегося Солнца, сходные по природе с процессами солнечной активности, но значительно более мощные. При этом из Солнца выбрасывались потоки плазмы, пронизанные магнитным полем. Взаимодействуя с магнитным полем туманности и самого Солнца, они передавали облаку значительный момент вращения, замедляя вращение Солнца и убыстряя вращение диска. При этом потоки

космических лучей, разогранных до скоростей, близких к скорости света, протонов и электронов, взаимодействуя с веществом диска, вызывали ядерные реакции, обогащая это вещество легкими элементами: бериллием, литием, бором, содержание которых в веществе планет намного больше, чем в Солнце.

В результате усиливающегося излучения Солнца во внутренних частях диска испаряются летучие вещества: водород, гелий. В более отдаленных частях диска, которые заэкранированы от непосредственного излучения Солнца внутренними его частями, происходит частичная конденсация этих веществ.

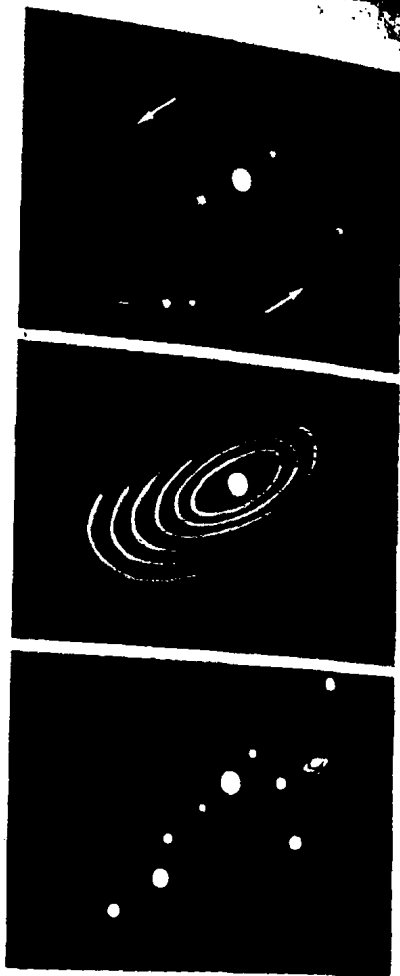


Рис. 105. Образование Солнечной системы.

**2. Формирование планет.** По мере сжатия диска его средняя плотность растет. По достижении ее критического значения начинается распад диска на отдельные сгущения. Возможно, что диск распадается на отдельные торы (рис. 105). Внутри тора частицы имеют малые относительные скорости, поэтому при столкновениях они слипаются, образуя промежуточные компактные тела астероидных размеров. Скорость роста этих тел в высокой степени зависит от массы, поэтому в очень скором времени внутри каждого тора (теперь это уже чисто геометрическое понятие) остается только одна планета. Рост планет происходит очень быстро. Так, расчеты показывают, что рост Земли до современных размеров продолжался всего 100 000 000 лет. Выпадение отдельных указанных тел на Землю и ее сжатие привели к разогреву ее недр. Со временем строение Земли изменялось, приближаясь к современному состоянию. Падающие тела астероидных размеров оставляли следы на поверхности планет в виде гигантских воронок, кратеров и «морей». На Земле эти следы постепенно исчезли под действием атмосферы и воды. На Меркурии и Луне они остались неприкосновенными, на Марсе — существенно сглаженными.

Возмущения, создаваемые притяжением гигантского Юпитера, помешали первичным телам в зоне астероидов объединиться в единую планету.

В отдаленных от Солнца областях сохранился присущий всему веществу во Вселенной избыток водорода и гелия. Это объясняет современный химический состав внешних планет (от Юпитера до Плутона).

Таким образом, современная схема происхождения Солнечной системы хорошо объясняет основные особенности ее строения.

## ОТВЕТЫ

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Глава I. 5. 4 — 2 — 1 — 3.</p> <p>Глава II. 2. <math>\varphi + \delta &gt; 90^\circ</math>; <math>\varphi - \delta &gt; 90^\circ</math>.</p> <p>4. <math> \varphi  \geq 66^\circ 33'</math>.</p> <p>6. Через 14,7 сут, т. е. 29 или 30 мая.</p> <p>9. На пределе.</p> <p>Глава III. 1. <math>\approx 5</math> а. е.</p> <p>6. 1, 88 и 0,94 км/с.</p> <p>Глава V. 1. 3000 К.</p> <p>3. <math>10^9</math> лет.</p> <p>5. 500 пк.</p> <p>7. <math>\approx 5,5</math> года.</p> <p>Глава VI. 4. <math>10^{11}</math> лет.</p> <p>7. <math>5 \cdot 10^{24}</math> кг/с; <math>50 M_\odot</math> /год.</p> | <p>6. Вторая звезда.</p> <p>3. <math>\pm 23^\circ 27'</math>.</p> <p>5. <math>h = 90^\circ - \delta + \varphi</math>.</p> <p>7. Нет.</p> <p>10. <math>2 \cdot 10^7</math> лет.</p> <p>3. <math>\approx 1/17</math>.</p> <p>7. <math>\approx 3,2</math> км/с; <math>\approx 0,8</math> км/с; <math>\approx 5</math> сут.</p> <p>2. <math>\frac{E_{\text{фал}}}{E_{\text{фот}}} \approx 1,21</math> (в центре). <math>\frac{E_{\text{фал}}}{E_{\text{фот}}} \approx 2</math> (на краю).</p> <p>4. <math>3200:1:2 \cdot 10^{-4}</math>.</p> <p>6. <math>5 M_\odot</math>; <math>1 M_\odot</math>.</p> <p>8. <math>\approx 10:1</math>.</p> <p>6. 10 Мпк; 40 Мпк; 400 Мпк.</p> <p>8. <math>10^8</math> и <math>10^{10}</math> лет.</p> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

## Астрономические наблюдения

Программой предусмотрено проведение наблюдений (4 ч). К ним необходимо предварительно подготовиться: выбрать площадку, на которой можно будет разместить школьный телескоп, определить направление север — юг. Площадка должна быть по возможности защищена от внешних источников света и иметь открытый горизонт в южной части неба. Следует помнить, что наблюдения в полосе  $10\text{—}15^\circ$  от горизонта не проводятся. Школьный телескоп рекомендуется устанавливать заранее (до начала занятий). Для наблюдений можно также применять и другие оптические приборы: бинокли, подзорные трубы.

Используя астрономические календари (на текущий год) и подвижную карту звездного неба, нужно наметить объекты, которые будут наблюдаться, оценить их расположение на видимой части небесной сферы.

Для вечерних наблюдений желательно выбрать ясные безлунные вечера.

Первые наблюдения можно проводить после изучения материала первых двух параграфов учебника. Но более реальный срок — конец октября — начало ноября, так как (после отмены летнего времени) темнеет в этот период года достаточно рано.

На первом занятии полезно ознакомиться с общим видом звездного неба, некоторыми созвездиями, найти ближайшую к нам галактику — туманность Андромеды, звездные скопления в Персее, двойные звезды (в Лиры, Алькор и Мицар и др.), рассмотреть строение Млечного Пути и т. д.

Второе занятие следует провести после изучения материала о Луне.

Для наблюдений надо выбрать ясный вечер незадолго до или сразу после наступления первой четверти Луны. Луну можно наблюдать в бинокль, но потом ее нужно обязательно показать в школьный телескоп с окуляром, дающим максимальное увеличение.

Следует обратить внимание на тени лунных гор, форму и число кратеров, светлые лучи у кратеров Тихо и Коперника, а также на то, что за терминатором видны освещенные вершины гор.

Третье наблюдение рекомендуется посвятить Солнцу. Проводить его надо в ясный день после уроков.

Изображение Солнца проецируется на экран и зарисовывается наблюдателями. Отмечается положение факелов и солнечных пятен. Для получения более ясных и четких изображений деталей применяется следующий прием: в то место, где проецируется пятно (или факел), подводят листок бумаги и двигают его быстрым колебательным движением; тогда неровности бумаги сливаются и изображение кажется более четким.

Особое внимание следует уделить потемнению к краю и границе диска Солнца.

Четвертое наблюдение полезно выполнить зимой — в январе-феврале. Объектами наблюдений служат планеты (в зависимости от условий видимости их можно наблюдать и в первый вечер). Следует обратить внимание на видимые диски планет. Если изображение хорошее, на диске Юпитера можно увидеть полосы, а у Сатурна кольца.

Обязательно нужно увидеть (только при достаточно темном небе, т. е. при полном отсутствии Луны) туманность Ориона.

Желающие могут проводить более длительные наблюдения. Например, проследить за движением планеты среди звезд, для чего нужно ежедневно или с интервалом в несколько дней отмечать положение планеты на звездной карте, или пронаблюдать изменение высоты Солнца, тоже в течение длительного промежутка времени. Наконец, самые упорные и интересующиеся могут заняться наблюдениями переменных звезд.

Хорошая инструкция для любительских наблюдений содержится в книге В. П. Цессевича «Что и как наблюдать на небе» (М.: Наука, 1984).

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### 1. Приближенные числовые значения наиболее важных величин, встречающихся в астрономии

|                                                                                                      |                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| Видимый угловой диаметр Солнца и Луны . . . . .                                                      | 1/2°               |
| Наклон эклиптики к экватору . . . . .                                                                | 23 1/2°            |
| Средний радиус Земли . . . . .                                                                       | 6370 км            |
| Разность экваториального и полярного радиусов Земли . . . . .                                        | 21 км              |
| Продолжительность года . . . . .                                                                     | 365 сут 5 ч 49 мин |
| Продолжительность синодического месяца (промежуток между двумя одинаковыми лунными фазами) . . . . . | 29 1/2 сут         |

|                                                                                               |                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Продолжительность звездного (сидерического) месяца (период обращения Луны вокруг Земли) . . . | 27 1/3 сут                                                  |
| Масса Солнца по сравнению с массой Земли . . .                                                | 330 000                                                     |
| Самый короткий период обращения планеты (Меркурия) . . . . .                                  | 3 месяца (88 сут)                                           |
| Самый долгий период обращения планеты (Плутон) . . . . .                                      | 250 лет                                                     |
| Диаметр самой большой планеты (Юпитера) . . .                                                 | 11 диаметров Земли                                          |
| Среднее расстояние Луны от Земли . . . . .                                                    | 380 000 км                                                  |
| Среднее расстояние Земли от Солнца, или 1 астрономическая единица . . . . .                   | 149 500 000 км                                              |
| 1 парсек . . . . .                                                                            | 206 265 а. е., или<br>3 1/4 св. года                        |
| Расстояние от Солнца до ближайшей планеты (Меркурия) . . . . .                                | 0,4 а. е.                                                   |
| Среднее расстояние от Солнца до самой далекой планеты (Плутон) . . . . .                      | 40 а. е.                                                    |
| Расстояние от Солнечной системы до ближайшей звезды ( $\alpha$ Центавра) . . . . .            | 4 св. года, или<br>1 1/3 пк, или 270 000 а. е.              |
| Поперечник нашей звездной системы — Галактики                                                 | 100 000 св. лет                                             |
| Расстояние до ближайшей спиральной звездной системы — галактики в созвездии Андромеды . .     | 2 000 000 св. лет                                           |
| Число звезд, видимых невооруженным глазом . .                                                 | около 6000                                                  |
| Диаметр Луны по сравнению с диаметром Земли . .                                               | 1/4                                                         |
| Диаметр Солнца по сравнению с диаметром Земли                                                 | 109                                                         |
| Температура поверхности Солнца . . . . .                                                      | 6000 К                                                      |
| Средний период изменения числа солнечных пятен                                                | 11 лет                                                      |
| Температура звезд . . . . .                                                                   | от 3000 К (красные звезды) до 30 000 К (голубоватые звезды) |
| Возраст земной коры . . . . .                                                                 | около 5 млрд. лет                                           |
| Весеннее равноденствие . . . . .                                                              | « 21 марта                                                  |
| Летнее солнцестояние . . . . .                                                                | « 22 июня                                                   |
| Осеннее равноденствие . . . . .                                                               | « 23 сентября                                               |
| Зимнее солнцестояние . . . . .                                                                | « 22 декабря                                                |

## II. Характеристики тел Солнечной системы

| Тела<br>Солнечной<br>системы | Звездный<br>период<br>обращения,<br>годы | Среднее<br>расстояние<br>от Солнца |         | Масса,<br>в массах<br>Земли,<br>$M_{\oplus}=1$ | Средняя<br>плот-<br>ность,<br>г/см <sup>3</sup> | Экваториальный<br>диаметр               |           | Звездный<br>период<br>вращения<br>вокруг оси | Наклон<br>экватора<br>к плоскости<br>орбиты | Число<br>извест-<br>ных спут-<br>ников<br>планет |
|------------------------------|------------------------------------------|------------------------------------|---------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------|
|                              |                                          | а. е.                              | млн. км |                                                |                                                 | в диаметрах<br>Земли,<br>$D_{\oplus}=1$ | км        |                                              |                                             |                                                  |
| Меркурий                     | 0,241                                    | 0,387                              | 58      | 0,05                                           | 5,44                                            | 0,38                                    | 4 880     | 58,65 сут                                    | 30°                                         | —                                                |
| Венера                       | 0,615                                    | 0,723                              | 108     | 0,82                                           | 5,24                                            | 0,95                                    | 12 100    | 243,0° сут                                   | 3°                                          | —                                                |
| Земля                        | 1,00                                     | 1,00                               | 150     | 1,00                                           | 5,52                                            | 1,00                                    | 12 756    | 23°56'4 <sup>c</sup>                         | 23°27'                                      | 1                                                |
| Марс                         | 1,881                                    | 1,524                              | 228     | 0,11                                           | 3,95                                            | 0,53                                    | 6 800     | 24°37'23 <sup>c</sup>                        | 25°12'                                      | 2                                                |
| Юпитер                       | 11,86                                    | 5,203                              | 778     | 318                                            | 1,33                                            | 11,2                                    | 142 800   | 9°50 <sup>m</sup>                            | 3°06'                                       | 16                                               |
| Сатурн                       | 29,46                                    | 9,539                              | 1426    | 95,1                                           | 0,69                                            | 9,5                                     | 120 660   | 10°14 <sup>m</sup>                           | 26°24'                                      | 17                                               |
| Уран                         | 84,01                                    | 19,19                              | 2869    | 14,6                                           | 1,26                                            | 3,9                                     | 50 800    | 24,4 <sup>ч</sup>                            | 98°                                         | 14 (?)                                           |
| Нептун                       | 164,7                                    | 30,07                              | 4496    | 17,2                                           | 1,67                                            | 3,9                                     | 49 500    | 17,8 <sup>ч</sup>                            | 29°                                         | 2                                                |
| Плутон                       | 248,9                                    | 39,65                              | 5929    | 0,002—<br>0,004                                | 0,3?                                            | 0,45                                    | 1 500     | 6,4 сут                                      | ?                                           | 1                                                |
| Солнце                       | —                                        | —                                  | —       | 333 000                                        | 1,4                                             | 109,1                                   | 1 392 000 | 25,4 сут                                     | 7°15'                                       | —                                                |

### III. Характеристики некоторых типичных звезд

| Название звезды                   | Масса, в массах Солнца | Светимость, в светимостях Солнца | Радиус, в радиусах Солнца | Температура, в кельвинах | Плотность по отношению к плотности воды |
|-----------------------------------|------------------------|----------------------------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Главная последовательность</b> |                        |                                  |                           |                          |                                         |
| ξ Возничего                       | 10,2                   | 220                              | 3,5                       | 11 000                   | 0,33                                    |
| Вега                              | 2,8                    | 52                               | 3,0                       | 9 500                    | 0,14                                    |
| Сириус А                          | 2,1                    | 22,4                             | 2,0                       | 9 250                    | 0,36                                    |
| α Центавра                        | 1,02                   | 1,3                              | 1,2                       | 5 730                    | 0,80                                    |
| 70 Змееносца                      | 0,8                    | 0,51                             | 0,89                      | 4 900                    | 2,2                                     |
| Крюгер 60                         | 0,3                    | $7 \cdot 10^{-3}$                | 0,26                      | 3 000                    | 20,72                                   |
| <b>Гиганты</b>                    |                        |                                  |                           |                          |                                         |
| Капелла                           | 3,3                    | 220                              | 23                        | 5 200                    | $4 \cdot 10^{-4}$                       |
| Арктур                            | 4,2                    | 130                              | 26                        | 4 100                    | $3 \cdot 10^{-4}$                       |
| Альдебаран                        | 5,0                    | 160                              | 45                        | 3 600                    | $5 \cdot 10^{-5}$                       |
| <b>Сверхгиганты</b>               |                        |                                  |                           |                          |                                         |
| Ригель                            | 40                     | $2 \cdot 10^5$                   | 138                       | 11 200                   | $2 \cdot 10^{-5}$                       |
| Антарес                           | 18                     | $3 \cdot 10^4$                   | 560                       | 3 300                    | $1,5 \cdot 10^{-7}$                     |
| <b>Белые карлики</b>              |                        |                                  |                           |                          |                                         |
| 40 Эридана                        | 0,44                   | $3,5 \cdot 10^{24}$              | $1,7 \cdot 10^{-2}$       | 10 000                   | $1,25 \cdot 10^8$                       |
| Сириус В                          | 1                      | $2,7 \cdot 10^{-3}$              | $2 \cdot 10^{-2}$         | 8 200                    | $1,75 \cdot 10^6$                       |

### VI. Физические характеристики некоторых типичных галактик

| Название или номер по каталогу | Светимость, в $L_{\odot}$ | Масса, в $M_{\odot}$  |
|--------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| Квазары                        | $10^{14} - 10^{15}$       | ?                     |
| Ярчайшие галактики скоплений   | $3 - 5 \cdot 10^{11}$     | $10^{13}$             |
| Дева А, Сомбреро               | $10^{11}$                 | $10^{12}$             |
| Туманность Андромеды           | $10^{10}$                 | $3 - 6 \cdot 10^{11}$ |
| Магеллановы Облака             | $10^9$                    | $10^{10}$             |

# ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                       |           |                                                                    |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------|------------|
| Об учебнике . . . . .                                                                 | 3         | § 13. Физическое строение планет группы Юпитера . . .              | 63         |
| <b>Глава I. Введение . . . . .</b>                                                    | <b>5</b>  | § 14. Луна . . . . .                                               | 65         |
| § 1. Начальный период развития астрономии . . . . .                                   | —         | § 15. Меркурий . . . . .                                           | 69         |
| § 2. Становление современной астрономии . . . . .                                     | 14        | § 16. Венера . . . . .                                             | 71         |
| <b>Глава II. Видимый мир . . . . .</b>                                                | <b>23</b> | § 17. Марс . . . . .                                               | 75         |
| § 3. Небесная сфера и ее вращение. Измерение времени . . . . .                        | —         | § 18. Юпитер, Сатурн и другие планеты-гиганты . . . . .            | 78         |
| § 4. Годичное движение Солнца. Эклиптика. Календарь . . . . .                         | 27        | § 19. Астероиды и метеориты . . . . .                              | 81         |
| § 5. Координаты на небесной сфере. Звездные карты и каталоги . . . . .                | 30        | § 20. Кометы . . . . .                                             | 84         |
| § 6. Изменение координат со временем. Прецессия. Собственные движения звезд . . . . . | 32        | <b>Глава V. Мир звезд . . . . .</b>                                | <b>88</b>  |
| § 7. Движение Луны. Затмения . . . . .                                                | 35        | § 21. Солнце . . . . .                                             | —          |
| <b>Глава III. Мир тяготения . . . . .</b>                                             | <b>42</b> | § 22. Строение солнечных оболочек . . . . .                        | 93         |
| § 8. Задача двух тел. Законы Кеплера . . . . .                                        | —         | § 23. Солнечная активность и ее земные проявления . . . . .        | 98         |
| § 9. Возмущенное движение. Возмущающие силы. Приливы . . . . .                        | 46        | § 24. Звезды . . . . .                                             | 102        |
| § 10. Механика космического полета . . . . .                                          | 50        | § 25. Переменные звезды . . . . .                                  | 108        |
| <b>Глава IV. Мир планет . . . . .</b>                                                 | <b>59</b> | § 26. Физические условия внутри звезд. Источники энергии . . . . . | 115        |
| § 11. Строение Солнечной системы . . . . .                                            | —         | § 27. Модели звезд . . . . .                                       | 119        |
| § 12. Физические характеристики планет группы Земли . . . . .                         | 61        | <b>Глава VI. Мир галактик . . . . .</b>                            | <b>123</b> |
|                                                                                       |           | § 28. Наша Галактика . . . . .                                     | —          |
|                                                                                       |           | § 29. Объекты нашей Галактики . . . . .                            | 125        |
|                                                                                       |           | § 30. Галактики . . . . .                                          | 130        |
|                                                                                       |           | <b>Глава VII. Развивающийся мир . . . . .</b>                      | <b>139</b> |
|                                                                                       |           | § 31. Большая Вселенная . . . . .                                  | —          |
|                                                                                       |           | § 32. От «Большого взрыва» до образований галактик . . . . .       | 142        |
|                                                                                       |           | § 33. Эволюция звезд . . . . .                                     | 146        |
|                                                                                       |           | § 34. Эволюция галактик . . . . .                                  | 151        |
|                                                                                       |           | § 35. Происхождение Солнечной системы . . . . .                    | 152        |

# ШКОЛЬНЫЕ УЧЕБНИКИ СССР

[SHEBA.SPB.RU/SHKOLA](https://sheba.spb.ru/shkola)

